6

سلسلة الكتب الجامعية المترجمة - العلوم الأساسية

دوغلاس س. جيانكولي

الفيزيـــاء

المبادئ والتطبيقات

العبيكان
obeikan

المملكة العربية السعودية
وزارة التعليم العالي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

الفيــزيــاء

المبادئ والتطبيقات

دوغلاس س جيانكولي

المملكة العربية السعودية
وزارة التعليم العالي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
وفوق كل ذي علم عليم

العبيكان
Obeikan

PHYSICS

Principles with Applications

6th Edition

Author: Douglas C. Giancoli

ISBN-13: 978-0130606204

ضمن سلسلة مشروع وزارة التعليم العالي لترجمة وطباعة ونشر كتب المقررات الجامعية العالمية

ح **مكتبة العبيكان، 1434هـ**

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

جيانكولي، دوغلاس س

الفيزياء: المبادئ والتطبيقات./ دوغلاس س جيانكولي؛ مجموعة من المترجمين.- الرياض 1434هـ

1034 ص؛ 20.5× 26 سم

ردمك: 4 - 535 - 503 - 603 - 978

1 - الفيزياء أ. مجموعة من المترجمين (مترجم) ب. العنوان

ديوي: 530 رقم الإيداع: 4870 / 1434

الطبعة العربية الأولى 1435هـ ـ 2014م

تمت الترجمة والمراجعة بإشراف وزارة التعليم العالي

اللجنة الإشرافية

د. محمد بن عبدالعزيز العوهلي

د. عبدالله بن إبراهيم المهيدب

وبمشاركة منسقي التخصصات (د. محمود بن أحمد منشي، د. ناصر بن صالح المنصور، د. سعيد بن محمد العمودي، د. خالد بن منصور الشعيبي)

الترجمة

أ. د. معروف خليل الشيخ إبراهيم د. حسان خالد الجوهري

د. موسى محمد عمران

المراجعة العلمية

د. أحمد فتحي سالم أ. د. محمد سعدالدين عبدالمنعم

د. إبراهيم محمود ناصر

التنسيق الإداري والمتابعة

معهد الأمير نايف للبحوث والخدمات الاستشارية، جامعة الإمام محمد بن سعود الإسلامية

المملكة العربية السعودية - الرياض - المحمدية - طريق الأمير تركي بن عبدالعزيز الأول هاتف: 4808654 فاكس: 4808095 ص.ب: 67622 الرياض 11517

العبيكان Obeikan

www.obeikanpublishing.com http://itunes.apple.com/sa/app/obeikan-store

المحتويات





11 الاهتزازات والموجات 286

12 الصوت 322



13 درجة الحرارة ونظرية الحركة 352

14 الحرارة 384

15 قوانين الديناميكا الحرارية 408



16 الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي 439

17 الجهد الكهربائي 470

18 التيارات الكهربائية 493

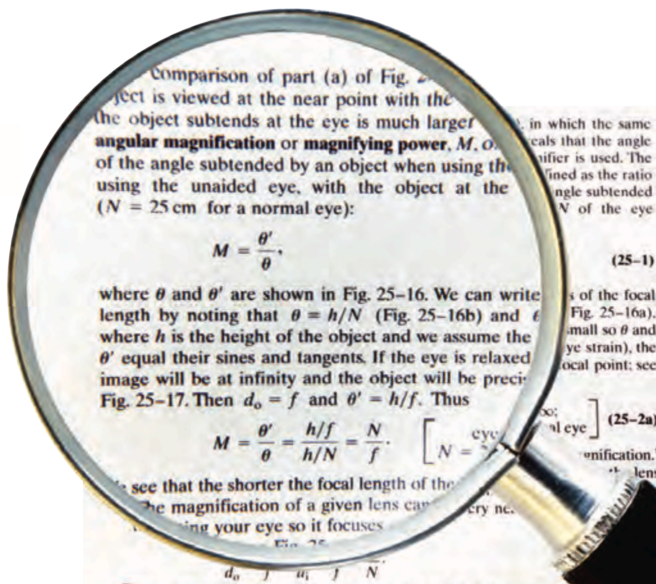
19 دارات DC 520

20 المغناطيسية 554

21 الحث الكهرومغناطيسي وقانون فارادي 584

22 الموجات الكهرومغناطيسية 615

23 الضوء؛ البصريات الهندسية 632



24 الطبيعة الموجية للضوء 664

25 الأجهزة البصرية 696

26 نظريّة النسبيّة الخاصّة 726

27 نظريّة الكمّ المبكرة والنماذج الذرّية 754



28 الميكانيكا الذرية للذرات 786

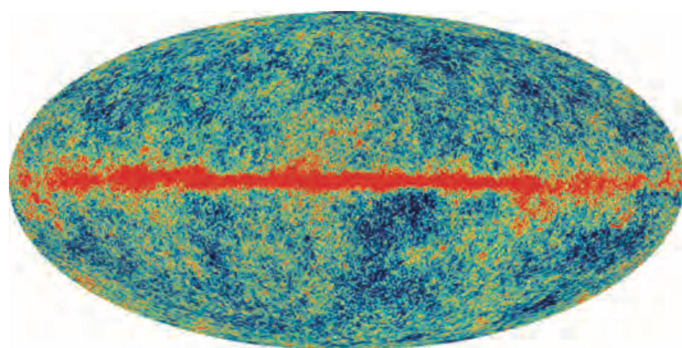
29 الجزيئات والمواد الصلبة 812

30 الفيزياء النووية والنشاط الإشعاعي 835

31 الطاقة النووية: تأثيرات الإشعاع واستخداماته 863



32 الجسيمات الأولية 889



33 الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات 914

تطبيقات في علم الأحياء والطب

صناديق حل المسائل

مقدمـــــــة

انظر إلى العالم من خلال أعين عليمة بالفيزياء

دُوِّن هذا الكتاب للطلاب بطريقة تزوّدهم بفهم شامل لمبادئ الفيزياء الأساسية في كافة النواحي؛ من الميكانيكا إلى الفيزياء الحديثة. وهو يهدف لتفسير الفيزياء بطريقة مقروءة وشائقة وسهلة الفهم وواضحة، وليعلّمهم من خلال توقع حاجاتهم المعرفية، والصعوبات التي تواجههم دون الإمعان في التبسيط. أما الهدف الثاني فهو بيان فائدة الفيزياء في حياتهم اليومية ومستقبلهم الوظيفي بواسطة تطبيقات جذّابة؛ إضافة إلى ذلك، فقد بُذل مجهود كبير على طرق حل المسائل ومنهجيتها. ويُعدّ هذا الكتاب مناسبًا للطلاب في سنتهم الأولى الراغبين بدراسة مدخل في مادة الفيزياء باستخدام الجبر وعلم المثلثات دون الحاجة إلى الرياضيات الحديثة. وقد يكون التخصص الرئيس لكثير من هؤلاء الطلاب علوم الأحياء أو الطب (التحضيري)، إضافة إلى آخرين منهم يدرسون هندسة العمارة أو الهندسة التقنية، أو علوم الأرض أو البيئة. إنّ كثيرًا من التطبيقات في هذه المجالات تعمد إلى الإجابة عن التساؤل العام للطلاب: «لماذا علينا دراسة الفيزياء؟» والإجابة عن ذلك هو أنّ الفيزياء أساسية في فهم هذه المجالات جميعها، كما سيرون هنا. والفيزياء هي كل شيء حولنا في عالمنا اليومي، ويُعدّ الهدف من هذا الكتاب هو مساعدة الطلاب على رؤية العالم من خلال أعين تعرف الفيزياء.

جديد ◀

تتضمن بعض المميزات الجديدة في هذه الطبعة السادسة وجود ما يأتي: 1- تمارين خلال النص لاختبار فهمهم. 2- بعض الفقرات الجديدة لأمثلة محلولة. 3- أمثلة جديدة تتبع التدريج في حل المسائل في كل صندوق حل. 4- فيزياء جديدة وتحديث دقيق للفصل 33 يتناول النموذج المعياري الكوني والفيزياء الفلكية إظهار أحدث النتائج الآنية في (تطور علم الكون). 5- تطبيقات حديثة كالوصف التفصيلي المعتمد على الفيزياء لشاشات البلورة السائلة (LCD)، وآلات التصوير الرقمية (مع CCD)، والتغطية الواسعة للأمان والأدوات الكهربائية؛ إضافة إلى نواحٍ أخرى مبينة في الأسفل.

الفيزياء وكيفية فهمها

لقد تجنبتُ النهج العام، والجاف المنفر في معالجة الموضوعات شكليًا وتجريديًا في البداية، وتُربط بعدها فقط المادة بخبرة الطالب الشخصية. وكان نهجي مبنيًا على إدراك أن الفيزياء هي وصف للحقيقة أولًا، ومن ثمَّ بدء كل موضوع بملاحظات وتجارب واقعية تمكن الطلاب من الارتباط بها ذهنيًّا، ثم الانتقال إلى التعميم والتعامل بشكل رسمي مع الموضوع، وتجعل هذه الطريقة المادة أكثر تشويقًا وأسهل فهمًا، إضافة إلى كونها أقرب إلى الطريقة الواقعية في التعامل مع الفيزياء. لقد بُذل مجهودٌ عظيم في جعل المادة الواجب على الطالب قراءتها في الفصول الأولى لا تشكل عبئًا كبيرًا عليه؛ فيجب تعلّم المبادئ الأساسية أولًا، ومن ثمَّ تأتي الموضوعات الأخرى لاحقًا عندما يكون الطالب أكثر استعدادًا. وإن لم نزوّد الطلاب بالتفاصيل الكثيرة بدايةً، فربما يجدون موضوع الفيزياء شائقًا ومسليًا ومفيدًا، ويطرحون خوفهم من هذا الموضوع جانبًا.

لقد أكدنا **على قوانين الفيزياء** البارزة باللون الغامق، أمّا على الهامش فبحروف كبيرة في داخل مستطيل. كما أُعطيت المعادلات المهمة جميعها أرقامًا لتميزها من تلك الأقل أهمية. وللمساعدة في التمييز بين المعادلات العامة والحالات الخاصة فقد وضعت محددات المعادلات المهمة بين قوسين بجانبها، ومثال على ذلك

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2 \qquad \text{(تسارع ثابت)}$$

إن **الرياضيات الحديثة** قد تكون عائقًا أمام فهم الطلاب، وقد كان التوجه أن تتضمن الاشتقاقات الخطوات جميعها؛ لذا، أُدمجت العمليات الرياضية المهمة، مثل جمع المتجهات وعلم المثلثات في النص عند أول حاجةٍ إليها، لتأتي في سياق الشرح بدلًا من عزلها في فصل تمهيدي منفرد.

وتحتوي الملاحق على مراجعة للجبر وعلم الهندسة (إضافة إلى عدة موضوعات متقدمة مثل: دوران محاور إسناد مرجعية، وقوى قصورية، وأثر كوريوليس؛ والسعة الحرارية للغازات وتجزئة الطاقة بالتساوي، وتحويلات لورنتز). واستخدمت وحدات النظام الدولي (SI) في كل مكان، وعُرفت الوحدات المترية الأخرى والبريطانية لأسباب معرفية.

يُعدّ الفصل الأول مهمًّا؛ فهو أساسي في الفيزياء لمعرفة أنّ هناك مقدارًا من **عدم اليقين** في كل قياس، ولمعرفة كيفية استخدام الأرقام المميزة للدلالة على ذلك، كما أنّ تحويل الوحدات والقدرة على وضع تقدير سريع يُعد من الأساسيات. إنّ الموضوعات الثقافية في بداية الفصل الأول تعمل على توسيع إدراك الشخص للعالم، ومع هذا فمن غير الضروري شرحها في الغرفة الصفية.

إنّ **التطبيقات** المتعددة تخدم كأمثلة على المبادئ الفيزيائية فقط، وهناك تطبيقات أخرى شرحت تفصيليًّا، واختيرت بدقة فائقة، ودُمجت في النص لكي لا تتداخل مع تطوير الفيزياء، بل لتزيدها وضوحاً. ولتسهيل ملاحظة التطبيقات، وضعت ملحوظة (تطبيقات فيزيائية) على الهامش.

لقد استخدمت **الألوان** بطريقة تعليمية لإظهار الفيزياء؛ فأعطيت ألوانًا مختلفة للمتجهات المختلفة (انظر المخطط على ص xxv). كما استخدم في طباعة هذا الكتاب خمسة ألوان لتقديم تنوع وتعريف أفضل لرسم المتجهات والمبادئ الأخرى مثل: المجالات والأشعة، كما اختيرت الصور الافتتاحية في كل فصل، وبعضها وضُع عليها متجهات، لتكون الملحوظات المصاحبة ملخصة للفصل إلى درجة ما.

إن بعض نواحي الفيزياء الجديدة وطرائق التعليم في الطبعة السادسة هي:

تطور الكون: عرضت النتائج الحديثة في علم الكون والفيزياء الفلكية نتيجة المساعدة الكبيرة من أعظم الخبراء في هذا المجال، ونقدم للقراء النتائج والتفسيرات الأحدث من (العصر الذهبي لعلم الكون).

الوضوح الفائق: لم يُهمل أي موضوع أو فقرة في هذا الكتاب بحثًا عن تحسين وضوح طريقة العرض، وعُدِّل ووُضّح الكثير، سواء أكان مهمًا أم غير مهم. وكان أحد أهداف إلغاء العبارات والجمل التي من شأنها إبطاء عملية النقاش الأساسية هو إبقاء الضروريات أولًا، وإعطاء التوضيحات لاحقًا.

جديد▶ **إشارة المتجهات، السهام:** يظهر أعلى رموز الكميات المتجهة في النص والأشكال سهم صغير لتشبه ما يكتبه الأستاذ بيده في المحاضرة، أمّا الأحرف فلا تزال تكتب غامقة بالصورة التقليدية: لذا $\vec{\mathbf{v}}$ للسرعة، و $\vec{\mathbf{F}}$ للقوة.

جديد▶ **تمارين** ضمن النص لقياس مدى استيعاب الطلاب. والإجابات في نهاية الفصل.

جديد▶ **أمثلة الخطوة خطوة**، بعد صندوق حل المسألة، كما نوقش صفحة xvii.

الأمثلة المفاهيمية ليست جديدة، ومع ذلك فهناك ما هو جديد.

الأمثلة المعدلة: أُظهرت خطوات رياضية أكثر، وأضيفت أمثلة جديدة كثيرة: انظر صفحة xvii.

طريقة عرض الصفحة: اشتقاقات كاملة. بذل اهتمام جدّي أكثر بكثير من الطبعة السابقة على طريقة تصميم كل صفحة. كما بذل مجهود هائل لإبقاء الاشتقاقات والنقاش المهيمن على الصفحات المقابلة. لذا، فإن تقليب الصفحات غير ضروري؛ لأن صفحات الكتاب تظهر جميعها أمامهم على صفحتين متقابلتين بوضوح.

جديد▶ **العناوين الفرعية:** كثير من البنود داخل الفصل قسّمت إلى بنود فرعية، لتجزأ بذلك الموضوعات إلى (معلومات) يمكن التعامل معها بصورة أفضل. وهي بذلك تتيح للطلاب (وقفات قصيرة) للراحة أو التقاط الأنفاس.

ملحوظات الهامش: تنبيه. تشير ملحوظات الهامش باللون الأزرق إلى موضوعات رئيسة، وموجز ومساعد لإيجاد الموضوعات خلال المراجعة، وهي أيضًا تشير إلى تطبيقات وملحوظات طرق الحل، ويشير نوع جديد سمي (تنبيه) إلى احتمالية الفهم الخاطئ المناقش في النص المجاور.

ومن أجل أن يكون حجم الكتاب مناسبًا، ولتخفيف العبء على الطلاب في الموضوعات المتقدمة، اختُصرت كثير من الموضوعات أوسرِّعت، إضافة إلى **حذف** قليل منها.

موضوعات فيزيائية جديدة ومراجعات رئيسة

هنا قائمة بالتغييرات أو الإضافات المهمة، علمًا أن هناك كثيرًا غيرها أيضًا مثل:

استخدام التماثل أكثر، ومن ضمنه لحل المسائل

جديد ◀ التحليل البعدي، اختياري (الفصل 1)

جديد ◀ رسومات توضيحية أكثر في علم الحركة (الفصل 2)

كفاءة الآلة (المحرك) (الفصلان 6، 15)

مبدأ الشغل والطاقة، وحفظ الطاقة: بند فرعي جديد (الفصل 6)؛ كما ذكر في الديناميكا الحرارية (الفصل 15) والكهرباء (الفصل 17)

القوة على كرة التنس (الطاولة) بواسطة المضرب (الفصل 7)

أجنحة الطائرة، والكرات المنحنية، والزوارق الشراعية، وتطبيقات مبدأ برنولي الأخرى: حُسنت ووُضِّحت بواسطة مادة جديدة (الفصل 5)

ميّز تداخل الموجة في الفضاء وفي الزمن (ضربات) (الفصل 11)

انزياح دوبلر للضوء (الفصل 12 حاليًا، إضافةً إلى الفصل 33)

جديد ◀ نصف قطر نجم عملاق

إعادة كتابة القانون الأول في الديناميكا الحرارية وتوسعته، وربطه بطريقة أفضل بمبدأ الشغل والطاقة وحفظ الطاقة (الفصل 15)

اختصار مصادر الطاقة (الفصل 15)

جديد ◀ تصنيف SEER (الفصل 15)

جديد ◀ فصل الشحنات في غير الموصلات (الفصل 16)

جديد ◀ قانون جاوس، اختياري (الفصل 16)

جديد ◀ الناسخات الضوئية وطابعات الحاسوب (الفصل 16)

التأكيد على اتجاهات القوى والمجالات الكهربائية بشكل أكبر (الفصلان 16، 17)

ربط الجهد الكهربائي بشكل أفضل مع الشغل، تفاصيل أكثر (الفصل 17)

جديد ◀ أثر العازلية في المكثف مع وصلة أو دونها بالفولتية، إضافة إلى تفاصيل أخرى (الفصل 17)

جديد ◀ اشتقاق سعة المكثف متوازي الصفيحتين، اختياري (الفصل 17)

جديد ◀ الخطر الكهربائي، التأريض (التوصيل بالأرض)، الأمان، قاطعات التيار: أُضيفت مواد جديدة كثيرة (الفصول 17، 18، وخاصة 19، 20، 21)

جديد ◀ التيار الكهربائي، نوقشت المفاهيم غير الصحيحة في الفصل 18

حُدّثت الموصلية الفائقة (الفصل 18)

عُرفت الفولتية الحديّة والقوّة الكهربائية المحركة (emf)، بتفصيل أكبر (الفصل 19)

اختُصرت المواد المغناطيسية (الفصل 20)

جديد ◀ لُخصت قواعد اليد اليمنى في جدول(الفصل 20)

فُصّل قانونا فارادي ولنز (الفصل 21)

اختصرت الدارات الكهربائية مُترددة التيار (AC) (الفصل 21)، وقُلل من أهمية تيار الإزاحة (الفصل 22)

ضغط إشعاع الأمواج الكهرومغناطيسية وزخمه (EM) (الفصل 22)

جديد ◀ أين ترى نفسك في المرآة؟ أين يمكنك أن ترى فعليًا صورة العدسة؟ (الفصل 23)

جديد ◀ شاشات البلورة السائلة (LCD) (الفصل 24)

جديد ◀ الفيزياء المعنية بآلات التصوير الرقمية و CCD (الفصل 25)

جديد ◀ الرؤية أسفل المياه (الفصل 25)

إعادة إنجاز الكتلة النسبوية (الفصل 26)

نتائج ثورية في علم الكون: تسطح الكون وعمره، WMAP، SDSS، والمادة الداكنة، والطاقة الداكنة (الفصل 33)

جديد ◀ الحرارة النوعية للغازات، تجزئة الطاقة بالتساوي (الملحق)

حل المسائل، بنهج جديد ومحسن

تُعد قدرتك على حلّ المسائل تقنية مهمة بشكل عام، كما ويُعَدُّ حلّ المسائل أيضًا طريقةً فاعلةً في فهم الفيزياء بعمق أكثر، وهذه بعض الطرق التي استخدمت في هذا الكتاب لمساعدة الطلّاب على حل المسائل بفاعلية جيدة.

صناديق طرق حل المسائل، هناك نحو 20 طريقة موجودة في هذا الكتاب (هناك قائمة على صفحة xiii)، كل واحدة توجز نهجًا خطوة بخطوة لحل المسائل بشكل عام، أو بشكل خاص للمادة المدروسة. وقد يجد أفضل الطلاب أن هذه (الصناديق) غير ضرورية، ويمكنهم عندئذٍ تجاوزها. ولكن، هناك كثير منهم قد يجدونها مفيدةً في تذكيرهم بالنهج العام والخطوات الممكن اتباعها للبدء في الحل، لقد وضع صندوق حل المسائل العام في البند 9-4 هناك، بعد أن حاول الطلاب جاهدين حل المسائل، لعلهم يتشجعون فيقرؤوه بتمعن، ويمكن قراءة البند 9-4 قبل ذلك حسب الرغبة. وليس المقصود أن تكون صناديق حل المسائل وصفات سحرية، بل دليلًا أو مرشدًا للحل، لذا فهي تتبع في بعض الأحيان الأمثلة لتكون ملخصًا للاستخدامات المستقبلية.

إن هدف بنود حلّ المسائل مثل البنود: (2-6، 3-6، 4-7، 6-7، 8-6، و 13-8) هو تقديم تدريب إضافي في موضوعات حل المسائل.

الأمثلة: تقع الأمثلة المحلولة - ذات العناوين؛ لتسهيل الرجوع إليها - في أربعة أصناف هي:

1- غالبيتها أمثلة محلولة عادية على أنها (مسائل تدريبية). كما أضيفت عدة أمثلة جديدة، وأُلغي القليل من الأمثلة القديمة، وأعيد حلّ الكثير منها بوضوح أكبر وبخطوات رياضية أكثر، وتكررت جملة «سبب استخدامنا هذه الطريقة»، ووجود فقرة النهج الجديد ليثار نقاش يتناول السبب والنهج، وكان الهدف هو (التفكير بصوت مرتفع) مع الطلاب؛ ليقودهم إلى تطوير فهم عميق . وتزداد درجة صعوبة الأمثلة المحلولة لمعظم الموضوعات تدريجيًّا، وكان أكثرها صعوبة يحاكي أكثر المسائل صعوبة والموجودة في نهاية كل فصل، وارتبط كثيرٌ من الأمثلة بتطبيقات من مجالات مختلفة وبالحياة اليومية.

2- **أمثلة الخطوة خطوة:** بعد كثير من صناديق الحل، نلاحظ أنّ المثال التالي محلول بالكامل خطوة خطوة مُتبعًا خطوات الصندوق السابق، وتُعد هذه الحلول طويلة ويمكن اعتبارها مكررة؛ لذا تمّ حل سؤال فقط من كل نوع بهذه الطريقة. ◀جديد

3- **أمثلة التقدير،** 10% تقريبًا من المجموع الكلّي قُصِد به المساعدة في تطوير المهارات اللازمة لتقدير الإجابة إلى أقرب مقدار، حتى وإن شحت المعلومات المتوافرة، أو استحال التكهن تحت أي ظرف بأي نتيجة محتملة. انظر على سبيل المثال البند 7-7، الأمثلة 1-6 إلى 1-9.

4- **أمثلة مفاهيمية:** يُعدّ كل منها سؤالًا سقراطيًّا، القصد منه تحفيز تجاوب الطالب قبل قراءة الجواب المعروض.

فقرة النهج: في الأمثلة المحلولة جميعها فقرة تقديمية مختصرة تسبق الحل، تُحدّد النهج والخطوات الممكن اتباعها لحل المسألة المعطاة. ◀جديد

ملحوظة: في كثير من الأمثلة (ملحوظة) مختصرة تظهر بعد الحل؛ لتعلق في بعض الأحيان على الحل نفسه، وفي أحيان أخرى لتذكر تطبيقًا، أو لتعطي نهجًا آخر بديلًا لحل المسألة. وتشير فقرات الملحوظة الجديدة هذه إلى انتهاء الحل، وتناول موضوع ذي علاقة بعد ذلك. وفي هذه الأماكن، قُصد بالعنوان الفرعي **(أمثلة إضافية)** إمكانية التغاضي عنها خلال القراءة الأولى، وعندما يعيد الطلاب قراءة الفصل، فإنهم يكتسبون دافعًا قويًّا لحل مجموعة أوسع من المسائل. ◀جديد ◀جديد

التمارين خلال النّص، بعد المثال أو الاشتقاق، تعطي الطلاب فرصة رؤية ما إذا كان استيعابهم كافيًا لحل سؤال بسيط أو إجراء حسابات بسيطة، وتعطى الإجابات في نهاية الصفحة الأخيرة من كل فصل. ◀جديد

كما وزيد عدد **المسائل** وتنوعت في نهاية كل فصل؛ وقد استبدل القديم منها أو أُعيدت كتابته بصورة أكثر وضوحًا، و/ أو غيرت قيمه العددية. ويحتوي كل فصل على مجموعة كبيرة من المسائل المرتّبة وفق البند، ودُرّجت استنادًا إلى مدى صعوبتها (تقريبًا)؛ فمسائل المستوى I سهلة، وصُمّمت لتعزيز ثقة الطلّاب بأنفسهم. أما مسائل المستوى II فهي (عادية)، وتقدّم درجة أعلى من التحدّي وتجمع في العادة بين مفهومين، ولكن مسائل المستوى III فهي الأكثر تعقيدًا، وهدفها (زيادة الفائدة) لأنها تتحدى الطلّاب حتى أكثرهم تفوقًا. إنّ التنسيق بواسطة رقم البند هو لمساعدة المدرسين في اختيار المادة التي يجب التركيز عليها، وهذا يعني أن تلك المسائل تعتمد عليها حتى نهاية تلك المادة في ذلك البند: ويمكن للمواد السابقة أن تعتمد عليها أيضًا.

المسائل العامة غير مصنّفة وجُمعت معًا عند نهاية كلّ فصل، وهي تعادل ٣٠٪ تقريبًا من المسائل كلّها، وليس ضروريًا أن تكون أكثر صعوبة، ولكنها تتطلب على الأغلب مادة من الفصول السابقة، وهي مفيدة للمدرسين الراغبين في تكليف الطلاب بحل مسائل قليلة دون منحهم أي تلميح حول درجة صعوبتها، أو ذكر البند الذي تنطوي فيه.

الأسئلة، عند نهاية كلّ فصل، وهي أيضًا مفاهيمية تساعد الطلاب على استخدام المبادئ والمفاهيم وتطبيقها، فيتعمق فهمهم نتيجة لذلك (أو أنهم يدركون حاجتهم إلى مزيد من الدارسة).

تحديد المسائل

أرى أن يحدّد المدرسون عددًا كبيرًا من مسائل المستويين I و II، إضافة إلى عدد قليل من المسائل العامة، على أن تكون مسائل المستوى III فقط (لزيادة المعرفة) من أجل تحدّي قدرات الطلاب المتميزين. وعلى الرغم من أن معظم مسائل المستوى I قد تبدو سهلة، إلاّ أنها تساعد في بناء الثقة بالنفس، كما أنها تُعدّ جزءًا مهمًا من العملية التعليمية، خاصةً في الفيزياء. إجابات المسائل فردية الترقيم موجودة في آخر الكتاب.

الترتيب

احتفظ ملخص الطبعة الجديدة بالترتيب التقليدي للموضوعات: الميكانيكا (الفصول من 1 إلى 9)؛ والموائع، والاهتزازات، والأمواج، والصوت (الفصول من 10 إلى 12)؛ والنظرية الحركية والديناميكا الحرارية (الفصول من 13 إلى 15)؛ والكهربائية والمغناطيسية (الفصول من 16 إلى 22)؛ والضوء (الفصول من 23 إلى 25)؛ والفيزياء الحديثة (الفصول من 26 إلى 33). تقريبًا الموضوعات التي تدرّس عادة في مساق في الفيزياء التحضيرية جميعها موجودة هنا.

يُعدّ عرف البدء بالميكانيكا المتبع منطقيًّا بسبب تطورها أولًا، إضافة إلى اعتماد الكثير من الموضوعات الأخرى عليها. وخلال الميكانيكا، هناك طرق مختلفة لترتيب الموضوعات تتسم بدرجة عالية من المرونة أخذها هذا الكتاب بالحسبان. وهنا، أفضّل تدريس مادة الاتزان السكوني بعد الميكانيكا بسب معاناة عدد كبير من الطلاب التعامل مع مبدأ القوة دون حركة. زِدْ على ذلك أنّ الاتزان السكوني حالة خاصّة من الديناميكا – ونحن ندرس الاتزان السكوني لنمنع المباني من أن تصبح ديناميكية (السقوط) ومع هذا، يمكن تغطية الاتزان السكوني (الفصل 9) قبل ذلك بعد مقدمة موجزة للمتجهات. وخيار آخر هو الضوء، والذي وضعته بعد الكهرباء والمغناطيسية والأمواج الكهرومغناطيسية. حيث يمكن أن يتم التعامل مع الضوء مباشرة بعد الأمواج (الفصل 11). ويمكن التعامل مع النسبية الخاصة (الفصل 26) مع الميكانيكا وفق الرغبة؛ ولنقل بعد الفصل 7.

ليس من الضروري أن تحظى الفصول المختلفة بأوزان متساوية، فإن كان كلّ من الفصلين 4 و 21 يحتاج إلى أسبوع ونصف إلى أسبوعين، فإن الفصل 12 أو 22 قد يحتاج كل منهما إلى نصف أسبوع فقط أو أقل من ذلك. وبما أن الفصل 11 يغطي الأمواج المستقرة، فإنه بالإمكان ترك الفصل 12 للقراءة الذاتية إن لم يتوافر الوقت الكافي لشرحه في الغرفة الصفية.

يحتوي الكتاب على مادة أكثر ممّا يمكن إعطاؤه في معظم منهج السنة الأولى، ومع هذا، فهناك حرية كبيرة في اختيار الموضوعات.

تُعد البنود الموسومة بنجمة (*) اختيارية، وهي تحتوي على مواد متقدمة في الفيزياء أكثر (ربما مادة لا تغطى في منهج فيزياء اعتيادي) و / أو تطبيقات شائقة وهي لا تحتوي على أي مادة ضرورية في الفصول اللاحقة، إلاّ ربما للبنود الاختيارية اللاحقة. وليس من الضروري أن تغطي البنود غير الموسومة جميعها بنجمة؛ وهناك حرية كبيرة في اختيار المادة المعطاة كذلك.

ولمنهج قصير، يمكن إلغاء المواد الاختيارية جميعها، إضافةً إلى أجزاء رئيسة من الفصول 10، و 12، و19، و 22، و 28، و 29، و 32، و 33، وربما أجزاء مختارة من الفصول 7، و 8، و 9، و 15، و 21، و 24، و 25، و 31. ويمكن للمواد التي لا تُغطّى في الفصل أن تكون مرجعًا للطلاب في دراساتهم اللاحقة.



صورة الأرض التُقطت من على علو 36,000 km، وتم تحسينها باستخدام الحاسوب. وتظهر في الصورة الأمريكيتان الشمالية والجنوبية بوضوح، كما تظهر السماء من على هذا العلو سوداء اللون (أما لماذا نرى السماء زرقاء من سطح الأرض، فقد نوقش ذلك في الفصل 24). سوف نبدأ هذا الفصل بتعلم بعض الأساسيات عن العلم ونظرياته والقياس ووحداته.
وسنتعلم أيضًا كيفية إجراء التقدير بسرعة.

الفصل 1

مقدمة، القياس والتقدير

تُعدّ الفيزياء العلم الأساسي بين العلوم جميعها، وهو علم يتناول سلوك المادة وتركيبها. ويقسم مجال الفيزياء عادة إلى **الفيزياء الكلاسيكية** التي تتضمن الحركة، والسوائل، والحرارة، والصوت، والضوء، والكهرباء، والمغناطيسية، أما القسم الآخر فهو **الفيزياء الحديثة**، وتتضمن موضوعات النسبية، والتركيب الذري، والمادة المكثفة، والفيزياء النووية والجسيمات الأولية، والكونيات وفيزياء الفلك. وقبل البدء بدراسة الفيزياء نفسها، دعنا ننظر بإيجاز كيف أن هذا النشاط الشامل الذي يسمى (علمًا) ومن ضمنه الفيزياء يمارس في الحقيقة.

1-1 طبيعة العلم

إن الهدف الرئيس للعلوم جميعها بما فيها الفيزياء هو البحث عن ترتيب ما لمشاهداتنا للعالم من حولنا. يعتقد كثير من الناس أن العلم عملية ميكانيكية لجمع الحقائق وابتكار النظريات، ولكنه في الحقيقة ليس بهذه السهولة؛ فالعلم عمل مبدع يشبه من نواح عديدة الأعمال الإبداعية للعقل البشري.



الشكل 1-1 يقف أرسطو، الشخصية الرئيسة (يرتدي الملابس الزرقاء) في هذه الصورة عند أعلى الدرج (والشخص الذي بجانبة أفلاطون). رسم هذه الصورة رفائيل سنة 1510 تقريبًا، وهي تمثل عصر النهضة المشهور لمدرسة أثينا. ويظهر في هذه الصورة التي تُعدّ إحدى التحف الفنية إقليدس (يرسم دائرة عند أسفل يمين الصورة) وبطليموس (أقصى يمين الصورة) وكذلك فيثاغورس وسقراط وديوجينس.

المشاهدة والتجربة

من أهم ميزات العلم **مشاهدة** الأحداث وملاحظتها، ويتضمن ذلك تصميم التجارب وإجراءها. وتتطلب المشاهدة خيالًا واسعًا؛ حيث لا يمكن للعلماء أبداً تضمين كل شيء في وصف مشاهداتهم. ولذلك يجب على العلماء وضع أحكام حول طبيعة الأشياء التي لها علاقة بمشاهداتهم وتجاربهم. فعلى سبيل المثال، كيف استطاع عالمان عظيمان مثل أرسطو (384-322 قبل الميلاد – الشكل1-1) وغاليليو (1564-1642 الشكل 2-17) تفسير الحركة على سطح أفقي. لقد لاحظ أرسطو أن الأجسام التي على سطح الأرض (أو على سطح طاولة)، تتأثر بداية بقوة دفع، ومن ثَمَّ تتباطأ دائمًا، وأخيرًا تقف. وهكذا استنتج أرسطو أن الحالة الطبيعية للأجسام هي السكون. أعاد غاليليو دراسة الحركة الأفقية في بداية العام 1600s، وتخيل أنه إذا أهمل الاحتكاك بين الجسم الذي تؤثر فيه القوة والسطح الأفقي الذي يتحرك عليه الجسم فإن الجسم يستمر في حركته على نحو غير محدد من غير أن يتوقف. واستنتج من ثَمَّ أن الحالة الحركية للجسم هي حالة طبيعية مثل تلك التي يمتلكها في حالة السكون. وبهذا التصور، أوجد غاليليو مفهومنا الحديث للحركة (الفصول 4,3,2) بالرغم من أن غاليليو توصل إليه نظريًّا من غير أن يتخلص من الاحتكاك في أثناء التجربة.

الحركة أمر طبيعي مثل السكون

النظريات

إن المشاهدة، والتجريب الدقيق، والقياس هي جانب من العملية العلمية، أما الجانب الآخر فهو الاختراع أو إيجاد **النظريات** التي تفسر المشاهدات وترتبها. فلا يمكن أن تُشتق النظريات مباشرة من المشاهدات، ولكن المشاهدات قد توحي بنظرية. ويتم قبول النظريات أو رفضها على أساس التجربة والمشاهدة.

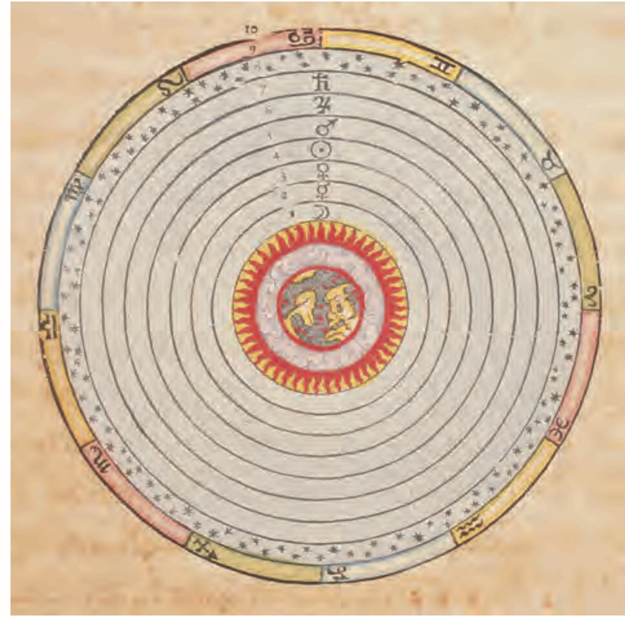
وتعد النظرية إلهامًا من العقل البشري، فعلى سبيل المثال، إن الفكرة التي تقول بأن المادة مكونة من ذرات (النظرية الذرية) لم يتم التوصل إليها من خلال المشاهدة المباشرة للذرات- فلا يمكن رؤية الذرات مباشرة، ولكنها نبعت من عقول مبدعة. وكذلك الحال، فإن نظرية النسبية والنظرية الكهرومغناطيسية للضوء وقانون نيوتن في الجذب العام كلها نتائج للخيال البشري.

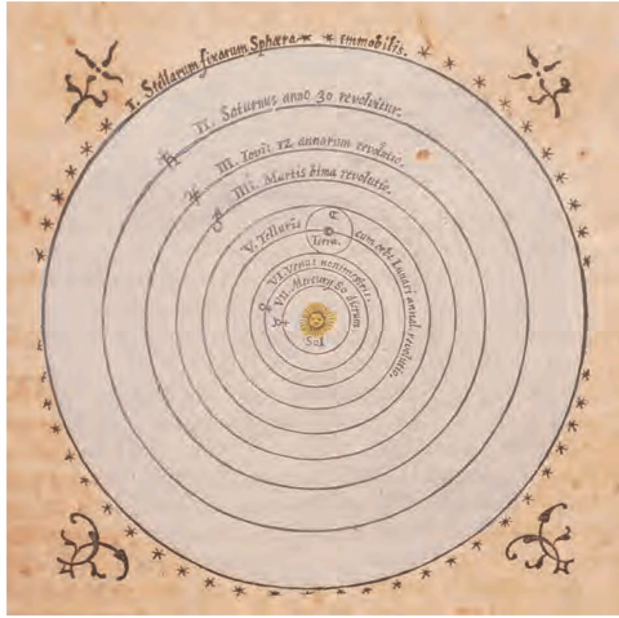
اختبار النظرية

يمكننا مقارنة نظريات العلم الرائعة كإنجازات إبداعية بالأعمال المهمة في الفن والأدب. ولكن كيف يختلف العلم عن الأعمال الإبداعية الأخرى؟ إن أحد أهم هذه الاختلافات هو أن العلم يشترط اختبار الأفكار والنظريات بالتجربة للتأكد من تنبؤاتها. ولكن النظريات لا تثبت بالاختبار، والسبب في ذلك عدم وجود جهاز قياس مثالي؛ أي أنه لا يمكن التأكد من صحة النظرية بالضبط. وعلاوة على ذلك لا يمكن اختبار النظرية لكل مجموعة من الظروف المحتملة. وعليه، فإنه لا يمكن إثبات أي نظرية على نحو مطلق. وفي الحقيقة فإن تاريخ العلم يخبرنا بأن هناك نظريات دامت أزمنة طويلة ثم حلت مكانها نظريات أخرى جديدة.

قبول النظرية

يقبل العلماء النظرية الجديدة في بعض الحالات؛ لأن تنبؤاتها تتفق كمّيًا مع التجربة على نحو أفضل من تلك التي للنظرية القديمة.


(أ)


(ب)

الشكل 1-2 (أ) يمثّل وجهة نظر بطليموس التي تقول إن الأرض مركز الكون. لاحظ وجود العناصر الأربعة للقدماء في المركز، وهي: الأرض، والماء، والهواء (الغيوم حول الأرض) والنار. تمثل الدوائر مع الرموز القمر وعطارد، والزهرة، والشمس، والمريخ، والمشتري، وزحل، ثم النجوم الثابتة وعلامات للبروج. (ب) تمثيل وجهة نظر كوبرنيكوس للكون؛ حيث تبدو الشمس مركزًا له (انظر الفصل 5).

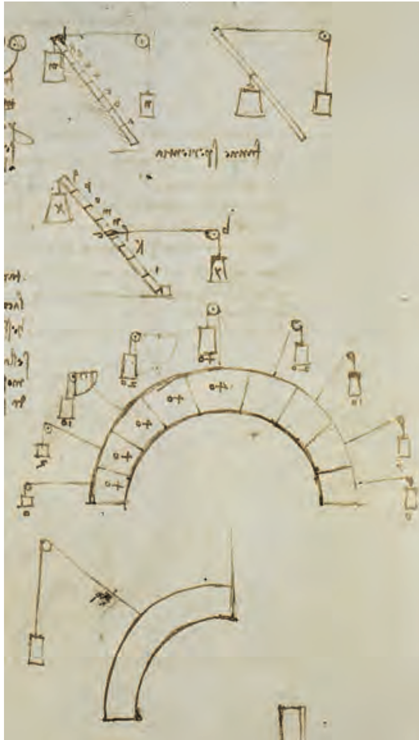
وتقبل النظرية الجديدة في حالات عديدة إذا قدمت تفسيرًا لعدد كبير من الظواهر أكثر مما قدمته النظرية القديمة؛ فعلى سبيل المثال، لم تكن نظرية كوبرنيكوس التي تعد الشمس مركز الكون (الشكل 1-2 ب) أكثر دقة من نظرية بطليموس التي ترى أن الأرض مركز الكون (الشكل 1-2 أ) من حيث التنبؤ بحركة الأجرام السماوية (الشمس، القمر، الكواكب). وقد كان لنظرية كوبرنيكوس نتائج لم تكن لنظرية بطليموس، مثل التنبؤ بمراحل ظهور كوكب الزهرة التي تشبه تلك التي للقمر. إن النظرية البسيطة والقيمة التي توحد العديد من الظواهر المتنوعة وتفسرها تكون أكثر فائدة بالنسبة للعالم. وهذه الميزة بالإضافة إلى الاتفاق الكمّي لها أثر كبير في قبول النظرية.

إن الميزة المهمة لأي نظرية هي كيف يمكن أن تتنبأ بالظواهر كميًّا وبفاعلية. ومن وجهة النظر هذه، فإن النظرية الجديدة تبدو في أغلب الأحيان تطويرًا بسيطًا للنظرية القديمة. وعلى سبيل المثال، تقدم نظرية آينشتاين النسبية تنبؤات تختلف قليلًا عن النظريات القديمة لغاليليو ونيوتن وخصوصًا في مواقف الحياة اليومية. ولكن تنبؤاتها أفضل في حالة السرعات العالية التي تقترب من سرعة الضوء. وليس التنبؤ الكمّي فقط هو النتيجة المهمة للنظرية، وإنما تغيُّر نظرتنا إلى العالم الذي يحيط بنا أيضًا؛ فقد تغيرت مفاهيمنا تمامًا عن الفضاء والزمن نتيجة لنظرية النسبية، فأصبحنا نرى الكتلة والطاقة كيانًا واحدًا (من خلال المعادلة المشهورة $E = mc^2$).

2-1 الفيزياء وعلاقتها مع المجالات الأخرى

لقد كان العلم لوقت طويل وحدة متكاملة تقريبًا ويعرف بالفلسفة الطبيعية. ولكن قبل قرن أو اثنين أصبحت الفروق بين الفيزياء والكيمياء وحتى علوم الحياة واضحة. وأما الفرق الواضح الذي نراه اليوم بين الفنون والعلوم فهو الفرق نفسه الذي كان سائدًا بينهما إلى قرون عدة خلت. ولا عجب في ذلك، إذ إن تطور الفيزياء أثّر في المجالات الأخرى وتأثر بها. لقد وجد على سبيل المثال أن دفاتر ملاحظات (الشكل 1-3) ليوناردو دفنشي - وهو باحث ومهندس، وأعظم فنان في عصر النهضة - تحتوي على أول مراجع للقوى التي تؤثر في البناء؛ على الرغم من رؤيتنا بأن هذا الموضوع يقع حاليًّا ضمن الفيزياء بالإضافة إلى علاقته بالعمارة وفن البناء.

الشكل 1-3 دراسات على القوى في الإنشاءات قام بها ليوناردو دفنشي (1452-1519).




(أ)


(ب)

الشكل 1-4 (أ) بنيت هذه القناة الرومانية قبل 2000 سنة، وما زالت باقية مكانها. (ب) انهيار مركز هارتفورد المدني في عام 1978 بعد سنتين فقط على بنائه.

إن البداية المبكرة للبحث في الكهرباء - التي أدت إلى اكتشاف البطارية الكهربائية والتيار الكهربائي - بدأ بها عالم بوظائف أعضاء الجسم يُدعى لويجي جلفاني في القرن الثامن عشر. لاحظ جلفاني ارتعاش أرجل الضفادع استجابة لشرارة كهربائية تعرضت لها، ثم لاحظ أن العضلات تنقبض عندما تلامس معدنين مختلفين (الفصل 18). وقد سميت هذه الظاهرة في البداية *(كهرباء الحيوان)*، وبعد ذلك بقليل، أصبح واضحاً أن التيار الكهربائي يمكن أن ينشأ بغياب الحيوان.

تطبق الفيزياء على الكثير من المجالات

تستخدم الفيزياء في العديد من المجالات؛ فعلى سبيل المثال، قد يجد عالم الحيوان أن الفيزياء مفيدة في فهم كيف تتمكن بعض أنواع الكلاب والحيوانات الأخرى من العيش تحت الأرض من غير أن تختنق. كما أن المعالج الطبيعي يؤدي عمله بفاعلية أكبر إذا كان على اطلاع بمبادئ تأثير القوى داخل الجسم البشري ومركز ثقله. كما أن معرفة مبادئ تشغيل المعدات البصرية والإلكترونية مفيدة للغاية في مجالات عديدة. ويهتم علماء الحياة ومصممو العمارة على حد سواء بطبيعة الحرارة التي تفقدها الكائنات الحية أو تكسبها، حيث تنعكس سلبًا أو إيجابًا على راحتها. ربما ليس من الضروري أن يقوم مصمم بناء ما بحساب أبعاد الأنابيب المستخدمة في نظام التدفئة أو حتى حساب القوى التي يشتمل عليها البناء، ومعرفة مدى تحمّله ليبقى قائمًا (الشكل 1-4)، ولكن عليه أن يعرف المبادئ الأساسية لهذه التحليلات حتى يتمكن من عمل تصميم واقعي كي يتواصل على نحو فاعل مع المهندس الاستشاري والاختصاصيين الآخرين. ومن وجهة نظر نفسية أو جمالية أيضًا، فإن مصمم البناء يجب أن يكون مدركًا للقوى التي يشتمل عليها البناء؛ لأن عدم استقراره قد يسبب الإزعاج لأولئك الذين يجب أن يعيشوا أو يعملوا فيه. كما وترتبط الفيزياء على نحو واسع مع مجالات أخرى. وفي الفصول القادمة سنناقش العديد من مثل هذه التطبيقات في أثناء قيامنا بالهدف الرئيس، وهو شرح الفيزياء الأساسية.

1-3 النماذج والنظريات والقوانين

النماذج

عندما يحاول العلماء فهم مجموعة معينة من الظواهر، فإنهم يستعملون **نموذجًا** ما. ومن الناحية العلمية يمثل النموذج تناظراً أو تخيلاً عقلياً للظواهر بدلالة شيء آخر مألوف لدينا. ومن الأمثلة على ذلك النموذج الموجي للضوء، فلا يمكن أن نرى أمواج الضوء كما نرى أمواج الماء؛ ومن ثَمّ فإنه من الضروري اعتبار الضوء مكوّناً من أمواج؛ لأن التجارب تدل على أن الضوء يسلك في جوانب عديدة سلوك أمواج الماء.

إن الغاية من النموذج هي تزويدنا بصورة بصرية أو عقلية تقريبية- شيء نعتمد عليه- عندما لا نستطيع فهم أو رؤية حقيقة ما يحدث. وفي أغلب الأحيان تمكننا النماذج من فهم الظواهر بعمق: فقد يؤدي التناظر مع نظام مألوف (على سبيل المثال موجات الماء في المثال السابق) إلى إجراء تجارب جديدة، وقد يزودنا أيضًا ببعض الأفكار حول ظواهر أخرى ذات علاقة من الممكن أن تحدث.

النظريات (مقابل النماذج)

وفي الحقيقة، هناك اختلاف بين **النظرية** والنموذج: فالنموذج يكون عادة بسيطًا نسبيًّا، ويعطي تركيبًا مشابهًا للظواهر التي ندرسها. أما **النظرية** فهي أكثر شمولاً وتفصيلاً من النموذج، وتعطي تنبؤات كمية ذات دقة عالية وقابلة للاختبار أيضًا. وعلى أي حال، يجب عدم الخلط بين النموذج أو النظرية والنظام الحقيقي أو الظواهر نفسها.

القوانين

والمبادئ

يقدم العلماء **القانون** على نحو مختصر ومفيد، ولكن بعبارات عامة، عن كيفية سلوك الظواهر الطبيعية (على سبيل المثال قانون حفظ الطاقة). وأحيانًا يتم عرض العبارة من خلال معادلة أو علاقة رياضية تربط بين كميات (مثل قانون نيوتن الثاني $F = ma$). وحتى تسمى العبارة قانوناً، يجب أن يتم إثباتها تجريبيًا، وعلى مجال واسع من الظواهر التي نشاهدها. أما العبارات غير العامة، فيستخدم مصطلح قاعدة لوصفها (مثل قاعدة أرخميدس). تختلف القوانين العلمية التي تتصف بالطابع الوصفي عن القوانين السياسية التي تتسم بالطابع التصويري. فالقوانين السياسية تبيّن كيف يجب أن يكون سلوكنا، في حين أن القوانين العلمية تصف لنا سلوك الطبيعة كما هو، وليس كيف **يجب أن** يكون. وكما هو الحال بالنسبة للنظريات، لا يمكن اختبار القوانين لعدد غير محدد من الحالات المتنوعة والمحتملة؛ ولذلك لا يمكن التأكد من صحة أي قانون على نحو مطلق. ونستخدم مصطلح (قانون) عندما تختبر صحته على مجال واسع من الحالات، وكذلك عندما يتم فهم الحالات الاستثنائية وحدود تطبيقه على نحو واضح. ويفترض العلماء عادة صحة القوانين والنظريات كأساس لعملهم على أن يكونوا يقظين في حال اكتشاف معلومات جديدة قد تغير صحة أي قانون أو نظرية.

4-1 القياس وعدم اليقين (مبدأ الريبة) والأرقام المعنوية

يبذل العلماء قصارى جهودهم لفهم العالم الذي يحيط بنا من خلال إيجاد علاقات رياضية تربط بين كميات فيزيائية يمكن قياسها.

عدم اليقين (مبدأ الريبة)

هناك عدم يقين في كل قياس.

تمثل الأقيسة الصحيحة والدقيقة جزءاً مهماً من الفيزياء. ولعدم وجود قياس دقيق ومطلق، فهناك عدم يقين في كل قياس. ومن بين أهم مصادر عدم الدقة، عدا عن الأخطاء الشخصية، محدودية الدقة في أجهزة القياس وعدم القدرة على قراءتها بعد جزء ما من أصغر تدريج عليه. فإذا استخدمنا على سبيل المثال مسطرة مدرجة بالسنتيمترات لقياس عرض لوح خشبي (الشكل 1-5) فيمكننا القول بأن قراءتنا دقيقة لغاية 0.1 cm (1 mm) وهو أصغر تدريج على المسطرة، بالرغم من أن نصف هذه القيمة قد يكون صحيحاً. وسبب ذلك هو أننا لا نستطيع تقدير قراءة المسطرة بين أصغر تدريجات عليها، إضافة إلى أن صناعة المسطرة نفسها قد لا تكون دقيقة*.

الشكل 1-5 قياس عرض لوح خشبي باستخدام مسطرة مدرجة بالسنتيمترات. الدقة في القياس ± 1 mm .



* هناك فرق تقني بين دقة القياس وصحة القياس: حيث يشير المعنى الحرفي للدقة إلى إمكانية تكرار القياس باستعمال جهاز معين. فعلى سبيل المثال، إذا قست عرض لوح خشبي عدة مرات وحصلت على نتائج مثل 8.82 cm ،8.78 cm ،8.85 cm ،8.81 cm (محاولاً في كل مرة تقدير أفضل قراءة بين العلامات التي تدل على 0.1 cm) في هذه الحالة يمكنك القول بأن الأقيسة تعطي دقة أفضل بقليل من 0.1 cm. أما صحة القياس فتدل على مدى قرب القيمة المقيسة من القيمة الحقيقة. وإذا صنعت المسطرة الموضحة في (الشكل1-5) بنسبة خطأ 2% فإن صحة قياسها لعرض اللوح الخشبي (حوالي 8.8 cm) تكون حوالي 2% من 8.8 cm، أو ± 0.2 cm تقريبًا. ويأخذ تقدير عدم التحديد بالحسبان كلاً من دقة القياس وصحته.

بيان عدم اليقين

عند عرض نتيجة قياس ما، فإنه من الضروري **بيان عدم اليقين في القياس**. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تكتب نتيجة قياس عرض اللوح الخشبي كما يأتي: 8.8 ± 0.1 cm ؛ حيث يمثل عدم اليقين في القياس بـ ± 0.1 cm (ويقرأ زائد أو ناقص 0.1 cm). ومن ثَمَّ فإن القيمة الحقيقية لعرض اللوح تقع على الأرجح بين 8.7 و 8.9 cm أما **النسبة المئوية لعدم اليقين** فتمثل النسبة بين عدم اليقين إلى القيمة المقيسة مضروبة في 100%. فإذا كان القياس 8.8 وعدم التحديد 0.1 cm فإن النسبة المئوية في عدم اليقين تساوي:

$$\frac{0.1}{8.8} \times 100\% \approx 1\%$$

حيث يعني الرمز $\approx$ يساوي تقريبًا.

افتراض عدم اليقين

وغالبًا ما تكتب القيمة المقيسة من غير الإشارة إلى عدم اليقين على نحو واضح. وفي مثل هذه الحالات نفترض أن عدم اليقين يمثل وحدة أو وحدات قليلة من آخر منزلة في القيمة المقيسة. وعليه، فإذا كانت القيمة المقيسة لعرض اللوح 8.8 cm فإن عدم اليقين يفترض أن يكون 0.1 cm أو 0.2 cm. إن من المهم في مثل هذه الحالة عدم كتابة القراءة 8.80 cm؛ لأن ذلك يتضمن أن عدم اليقين في حدود 0.01 cm ، وهذا يعني أنه من المحتمل أن يكون عرض اللوح بين 8.79 cm و 8.81 cm ولكنه في الحقيقة يقع بين 8.7 cm و 8.9 cm.

المثال المفاهيمي 1-1 **هل الماسة لك؟** طلبت إليك إحدى زميلاتك استعارة ماستك الثمينة كي تريها لعائلتها. وبما أنك قلقة على الماسة، فقد قمت بوزنها باستعمال ميزان، فكانت قراءته 8.17 g، وعدم اليقين في قراءته ± 0.05 g. وبعد أن أعادتها زميلتك في اليوم التالي، قمت بوزنها فكانت قراءة الميزان 8.09 g. فهل هذه هي ماستك؟

الإجابة: إن قراءات الميزان قياسات ليس من الضروري أن تعطي القيمة (الصحيحة) للكتلة؛ فكل قياس يمكن أن يكون أكثر أو أقل حتى 0.05 g أو ما يقاربها. إن الكتلة الحقيقة لماستك تقع على الأرجح بين 8.12 g و 8.22 g. والكتلة الحقيقة للماسة بعد أن أعادتها زميلتك تقع على الأرجح بين 8.04 g و 8.04 g. وهذه القيم تتداخل مع بعضها، لذلك ليس هناك سبب قوي للشك في أن الماسة التي أعيدت هي ليست ماستك على الأقل كما تظهرها قراءات الميزان.

الأرقام المعنوية

ما الارقام المعنوية؟

يسمى عدد الأرقام الموثوق بها في عدد ما بعدد **الأرقام المعنوية**؛ وعليه فهناك أربعة أرقام معنوية في العدد 23.21 cm أما عدد الأرقام المعنوية في العدد 0.062 cm فهو اثنان فقط (الأصفار التي في العدد الأخير هي مجرد حاملة مكان تبين أين يجب أن توضع الفاصلة العشرية). وقد لا يكون دائمًا عدد الأرقام المعنوية واضحاً. فإذا أخذنا على سبيل المثال العدد 80، فهل هناك رقم معنوي واحد أو رقمان؟ فإذا قلنا إن المسافة بين مدينتين **حوالي** 80 km ، فإن هناك رقماً معنوياً واحداً (وهو 8) لأن الصفر مجرد حامل مكان. أما إذا كانت المسافة 80 km **بالضبط** وبدقة من 1 إلى 2 km، فإن العدد 80 يحتوي على رقمين معنويين*. في حين إذا كانت المسافة 80 km بالضبط وعدم التحديد ± 0.1 km فإنها تكتب 80.0 km.

عند إجراء القياسات أو عمل الحسابات تجنب وضع أرقام كثيرة في الحل النهائي أكثر مما ينبغي. فعلى سبيل المثال، لحساب مساحة مستطيل أبعاده 11.3 cm في 6.8 cm فإن نتيجة الضرب 76.84 cm^2. ومن الواضح أن هذا الحل ليس دقيقًا لغاية 0.01 cm^2 لأنها من الممكن أن تكون (استعمل عدم اليقين المفترض لكل قياس) بين $11.2\ cm \times 6.7\ cm = 75.04\ cm^2$ و $11.4\ cm \times 6.9\ cm = 78.66\ cm^2$. وفي أحسن الأحوال يمكننا كتابة الحل 77cm^2 الذي يتضمن عدم تحديد يتراوح بين 1 و 2 cm^2. ومن ثَمَّ يجب إهمال الرقمين الآخرين (في العدد 76.84 cm^2) لأنهما ليسا رقمين معنويين. وكقاعدة عامة تقريبية (تؤخذ بالحسبان في حال عدم وجود تفاصيل عن عدم اليقين) يمكننا القول: «إن عدد الأرقام المعنوية في النتيجة النهائية لعملية الضرب أو القسمة يجب أن يساوي عددها في أقل الأعداد (المستعملة في العملية) أرقامًا معنوية» وفي مثالنا السابق نجد أن العدد 6.8 cm له أقل عدد من الأرقام المعنوية (اثنان فقط)؛ لذلك فإن النتيجة النهائية 76.84 cm^2 يجب أن تقرب إلى 77 cm^2.

حل المسألة

يجب أن يكون عدد الأرقام المعنوية في النتيجة النهائية مساويًا لأقل عدد أرقام معنوية في القيم المدخلة.

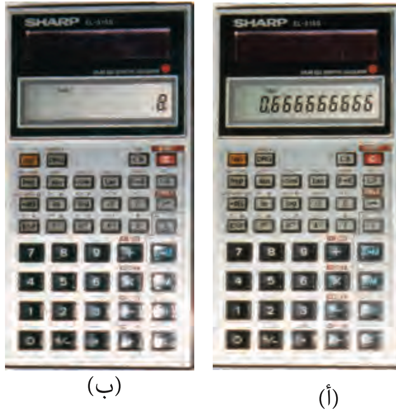
* إذا كان للعدد 80 رقمان معنويان، فإن بعضهم يفضل كتابته بوجود فاصلة عشرية؛ أي .80، ولكننا لا نقوم بذلك عادة، وعليه فإن عدد الأرقام المعنوية في العدد 80 يبقى غامضاً إلا إذا ذُكر شيء متعلق به، مثل كلمة حوالي (يعني 80 ± 10) أو قريباً جداً، أو بالضبط (يعني 80 ± 1).

التمرين أ: مستطيل أبعاده 4.5 cm في 3.25 cm، فإن مساحته بالشكل الصحيح تساوي:
(أ) $14.625\ cm^2$ (ب) $14.63\ cm^2$ (ج) $14.6\ cm^2$ (د) $15\ cm^2$

عند جمع الأعداد أو طرحها يجب ألا تكون النتيجة النهائية أكثر دقة من العدد الأقل دقة. على سبيل المثال: إن نتيجة طرح 0.57 من 3.6 هي 3.0 (وليس 3.03). عند استعمال آلة حاسبة، تذكر أن الأرقام التي تحصل عليها قد لا تكون كلها معنوية. فعند قسمة 2.0 على 3.0 يكون الحل المناسب 0.67 وليس 0.666666666. وهكذا فإن الأرقام الواردة في نتيجة ما يجب أن تكون كلها أرقامًا معنوية. و على أي حال، للحصول على أدق نتيجة يجب أن تضيف رقمًا معنويًا أو أكثر في أثناء إجراء الحسابات، ثم تقوم بتقريب النتيجة النهائية. (عند استعمال آلة حاسبة يمكنك إبقاء كل الأرقام ضمن النتائج المتوسطة). لاحظ كذلك أن الآلة الحاسبة تعطي أحيانًا أرقاماً معنوية أقل مما يجب. فعلى سبيل المثال، عند إجراء عملية الضرب 3.2×2.5 فإن الحل الذي قد تعطيه الآلة الحاسبة هو 8. ولكن الحل الصحيح يجب أن يشتمل على رقمين معنويين؛ لذلك فإن الحل المناسب هو 8.0 (الشكل 1-6).

تنويه !
تخطئ الآلات الحاسبة في الأرقام المعنوية.

حل المسألة
سجل العدد المناسب من الأرقام المعنوية فقط في النتيجة النهائية. أضف أرقاماً عشرية في أثناء عملية الحساب.


(أ) (ب)

الشكل 1-6 هاتان الحاسبتان تبينان عدداً غير صحيح للأرقام المعنوية. في (أ) 2.0 قسم على 3.0. النتيجة النهائية الصحيحة يجب أن تكون 0.67. في (ب) ضرب العدد 2.5 في 3.2. النتيجة الصحيحة 8.0.

التمرين (ب): هل للعددين 0.00324 و 0.00056 العدد نفسه من الأرقام المعنوية؟ توخَّ الحذر حتى لا تخلط بين الأرقام المعنوية وعدد المنازل العشرية.

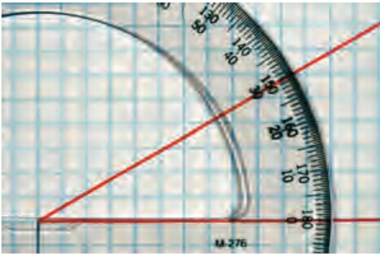
التمرين (جـ): بين عدد الأرقام المعنوية وعدد المنازل العشرية لكل عدد من الأعداد الآتية
(أ) 1.23 (ب) 0.123 (جـ) 0.0123

المثال المفاهيمي 1-2 **الأرقام المعنوية** استخدمت منقلة لقياس زاوية ما فكانت 30^o (الشكل 1-7) . (أ) ما عدد الأرقام المعنوية الذي تدونه لهذا القياس؟
(ب) استخدم آلة حاسبة لإيجاد جيب تمام الزاوية التي قمت بقياسها.

الحل (أ) إذا نظرت إلى المنقلة، فسترى أن الدقة في قياسك لزاوية ما حوالي درجة واحدة (بالتأكيد ليس 0.1^o)، لذلك يمكنك أن تدوّن رقمين معنويين؛ أي 30^o (وليس 30.0^o). (ب) إذا أدخلت $\cos 30^o$ إلى آلة حاسبة فستحصل على رقم مثل 0.866025403. على أي حال، بما أن الزاوية التي أدخلتها مكونة من رقمين معنويين فإن جيب تمام هذه الزوية يكتب بالشكل الصحيح 0.87؛ أي يجب أن تقرب إجابتك إلى رقمين معنويين.

ملحوظة: سنناقش في (الفصل 3) الدوال المثلثية، مثل جيب التمام.

الشكل 1-7 المثال 1-2 استعمال منقلة لقياس زاوية ما.



التدوين العلمي

تكتب الأعداد عمومًا بدلالة القوى للعدد عشرة أو بالتدوين العلمي، فعلى سبيل المثال يكتب العدد 36,900 هكذا 3.69×10^4 والعدد 0.0021 هكذا 2.1×10^{-3}. ومن فوائد التدوين العلمي (تمت مناقشته في الملحق أ) أنه يسمح لعدد الأرقام المعنوية أن يظهر على نحو واضح. ليس واضحًا فيما إذا كان العدد 36,900 يشتمل على ثلاثة أو أربعة أو خمسة أرقام معنوية. ويمكن تجنب مثل هذا الغموض باستخدام التدوين لقوى العدد عشرة: إذا كان العدد معروفاً بدقة ثلاثة أرقام معنوية فيُكتب 3.69×10^4، ولكن إذا كان معروفاً بدقة أربعة أرقام فيُكتب 3.690×10^4.

* الخطأ المئوي

إن قاعدة الأرقام المعنوية هي للتقريب فقط، وفي بعض الحالات قد تقلل من تقدير دقة الحل. لقسمة 97 على 92، نجد أن:

$$\frac{97}{92} = 1.05 \approx 1.1.$$

إن كل عدد من العددين 97 و 92 له رقمان معنويان؛ ولذلك فإن القاعدة تعطي الحل 1.1. وبالرغم من ذلك فإن كل عدد من العددين 97 و 92 يتضمن على عدم يقين ±1 إذا لم يذكر عدم اليقين آخر. ومن ثَمَّ فإن 92 ± 1 و 97 ± 1 يتضمن كل منهما دقة حول 1% ($1/92 \approx 0.01 = 1\%$). لكن النتيجة النهائية لرقمين معنويين هي 1.1 وتتضمن عدم يقين ±0.1، وهو ما يمثل $0.1/1.1 \approx 0.1 \approx 10\%$. وفي مثل هذه الحالة من الأفضل إعطاء الحل كما هو ودون تقريب؛ أي: 1.05 (الذي يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية). لماذا؟ لأن 1.05 يتضمن عدم تحديد ±0.01 وهو ما يمثل $0.01/1.05 \approx 0.01 \approx 1\%$ أي عدم اليقين نفسه الذي للأعداد الأصلية 92 و 97.

اقتراح : استخدم قاعدة الأرقام المعنوية، وخذ بالحسبان النسبة المئوية في عدم اليقين، ثُمَّ أضف رقماً عشرياً إضافياً إذا كان ذلك يقدم تقديراً أكثر واقعية لعدم اليقين هذا.

5-1 الوحدات والمعايير والنظام الدولي للوحدات

تقاس أي كمية بالنسبة إلى معيار أو **وحدة معينة**، ويجب تحديد هذه الوحدة بجانب القيمة العددية للكمية المقيسة؛ فعلى سبيل المثال: يمكننا قياس الطول بوحدات مثل البوصات، أو الأقدام، أو الأميال، أو في النظام المتري بالسنتيمترات أو الأمتار، أو الكيلومترات. إن تحديد طول جسم معين بالعدد 18.6 يكون بلا معنى؛ حيث يجب ذكر وحدة القياس التي تتبع العدد، لأن 18.6 مترًا تختلف تمامًا عن 18.6 بوصة أو عن 18.6 ميلمترًا. إن أي وحدة قياس نستعملها مثل المتر للمسافة أو الثانية للزمن، نحتاج إلى تعريفها بواسطة معيار معين يُعرّف **بالضبط** ما هو المتر أو الثانية. ومن المهم أن تكون المعايير التي تم اختيارها في متناول اليد، بحيث يمكن لأي شخص يحتاج إلى إجراء قياس دقيق جدًا الرجوع إلى المعيار الذي في المختبر.

الطول

معيار الطول (المتر)

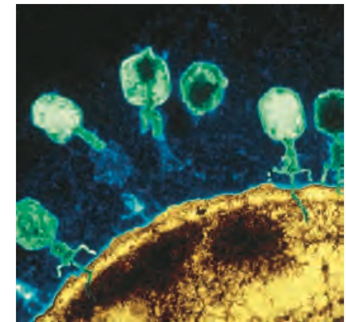
إن أول معيار دولي هو **المتر** (اختصاراً m)؛ حيث وُضع معيارٌ **للطول** من قبل الأكاديمية الفرنسية للعلوم في 1790. ولقد اختير المتر المعياري في الأصل كي يمثل جزءاً من عشرة ملايين من المسافة التي بين خط الاستواء وأي من القطبين* وقد صمم قضيب من البلاتين ليمثل هذا الطول. (المتر الواحد تقريبًا يساوي المسافة من رأس أنفك إلى رأس أصابعك عندما تكون الذراع واليد ممدودتين إلى الخارج). وفي عام 1889، عُرّف المتر بدقة أكثر ليمثل المسافة بين علامتين محفورتين بدقة على قضيب خاص من سبيكة البلاتين والأريديوم. وفي عام 1960، أُعيد تعريف المتر للحصول على دقة كبيرة وقابلية إنتاج عالية ليساوي 1,650,763.73 طول موجة من ضوء برتقالي معين ينبعث من غاز الكربتون 86. وفي عام 1983، أُعيد تعريف المتر مرة أخرى، ولكن هذه المرة بدلالة سرعة الضوء (أفضل قيمة مقيسة لسرعة الضوء بدلالة التعريف القديم للمتر هي 299,792,458 m/s مع عدم يقين 1 m/s). والتعريف الجديد «المتر هو طول المسار الذي يقطعه الضوء في الفراغ خلال مدّة زمنية مقدارها 1/299,792,458 من الثانية»**.

إن الوحدات البريطانية للطول (بوصة، قدم، ميل) تُعرف الآن بدلالة المتر. فالبوصة مثلًا تعرف بدقة على أنها تساوي 2.45 سنتيمترًا (يكتب اختصارًا cm، حيث إن 1 cm = 0.01 m). وهناك معاملات تحويل أخرى موجودة في الجدول الذي على الجانب الداخلي للغلاف الأمامي لهذا الكتاب. ويبين (الجدول 1-1) بعض الأطوال، من الصغيرة جدًا إلى الكبيرة جدًا، مقربة إلى أقرب قوة من قوى العدد 10. انظر أيضًا إلى (الشكل 8-1).

الجدول 1-1: بعض الأطوال والمسافات المثالية (رُتبة المقدار)

الطول (أو المسافة)	الأمتار (تقريبًا)
النيوترون أو البروتون (نصف قطر)	10^{-15} m
الذرة	10^{-10} m
الفيروس [انظر الشكل 1-8 أ]	10^{-7} m
الورقة (سُمك)	10^{-4} m
عرض أصبع اليد	10^{-2} m
طول ملعب كرة القدم	10^{2} m
ارتفاع قمة إفرست [انظر الشكل 1-8 ب]	10^{4} m
قطر الأرض	10^{7} m
الأرض إلى الشمس	10^{11} m
الأرض إلى أقرب نجم	10^{16} m
الأرض إلى أقرب مجرة	10^{22} m
الأرض إلى أبعد مجرة مرئية	10^{26} m

الشكل 1-8 بعض الأطوال: (أ) فيروسات (طولها حوالي 10^{-7} m) تهاجم خلية. (ب) ارتفاع قمة إفرست بدلالة القوة عشرة هو 10^4 m (ولكي نكون دقيقين فإن الارتفاع 8850 m)



(أ)



(ب)

* تدل الأقيسة الحديثة لمحيط الأرض على أن الطول الذي قصد أقل بحوالي جزء من خمسين من 1%.

** بهذا التعريف الجديد للمتر، فإن القيمة الدقيقة لسرعة الضوء في الفراغ تساوي 299,792,458 m/s.

الجدول 1-2 : بعض الفترات الزمنية المثالية

المدّة الزمنية	الثواني (تقريبًا)
عمر جسيم أصغر من الذرة / غير مستقر	10^{-23} s
عمر عناصر مشعة	10^{-22} s — 10^{28} s
عمر الميون	10^{-6} s
الزمن بين نبضات قلب الإنسان	10^{0} s (= 1 s)
اليوم	10^{5} s
السنة	3×10^{7} s
مدة حياة الإنسان	2×10^{9} s
التاريخ المسجل	10^{11} s
الجنس البشري على الأرض	10^{14} s
الحياة على الأرض	10^{17} s
عمر الكون	10^{18} s

الجدول 1-3 : بعض الكتل

الجسم	كيلوغرام(تقريبًا)
الإلكترون	10^{-30} kg
البروتون/ النيوترون	10^{-27} kg
جزيء DNA	10^{-17} kg
البكتيريا	10^{-15} kg
البعوضة	10^{-5} kg
الخوخ	10^{-1} kg
الإنسان	10^{2} kg
السفينة	10^{8} kg
الأرض	6×10^{24} kg
الشمس	2×10^{30} kg
المجرة	10^{41} kg

الزمن

إن الوحدة المعيارية **للزمن** هي **الثانية** (s)، ولسنوات عديدة عرفت الثانية بأنها تساوي 1/86,400 من متوسط اليوم الشمسي. وتعرف الثانية المعيارية الآن بدقة أكبر بدلالة تردد الإشعاع المنبعث من ذرات السيزيوم عند مرورها بين حالتين محدّدتين. [وبالتحديد، فإن الثانية الواحدة تعرف على أنها الزمن الذي يستغرقه هذا الإشعاع لعمل 9,192,631,770 ذبذبات]. ومن هذا التعريف، نجد أن هناك 60s في كل دقيقة (min) و60 دقيقة في كل ساعة (h). يبين (الجدول 1-2) مجالاً من الحقب الزمنية المقيسة مقربة إلى أقرب قوة للأساس عشرة.

الكتلة

إن الوحدة **المعيارية** للكتلة هي **الكيلوجرام** (kg). والكتلة المعيارية هي أسطوانة مصنوعة من البلاتين والأريديوم، وتعرف كتلتها بالضبط لتساوي 1 kg، وهي محفوظة في المركز الدولي للقياس والأوزان قرب باريس في فرنسا. يبين (الجدول 1-3) الكتل [وللغايات العلمية، فإن 1kg يزن تقريبًا 2.2 باوند (lb) على سطح الأرض]. وعندما نتعامل مع الذرات والجزيئات فإننا نستخدم وحدة الكتلة الذرية الموحدة (u) ونعبر عنها بدلالة الكيلوغرام كما يأتي:

$$1\ \text{u} = 1.6605 \times 10^{-27}\ \text{kg}.$$

وفي الفصول اللاحقة، سوف نناقش تعريفات وحدات معيارية لكميات فيزياء أخرى.

الجدول 1-4: البادئات المترية (SI)

البادئة	الاختصار	القيمة
يوتا	Y	10^{24}
زيتا	Z	10^{21}
إكسا	E	10^{18}
بتا	P	10^{15}
تيرا	T	10^{12}
جيجا	G	10^{9}
ميجا	M	10^{6}
كيلو	k	10^{3}
هكتو	h	10^{2}
ديكا	da	10^{1}
ديسي	d	10^{-1}
سنتي	c	10^{-2}
ملي	m	10^{-3}
ميكرو*	μ	10^{-6}
نانو	n	10^{-9}
بيكو	p	10^{-12}
فيمتو	f	10^{-15}
آتو	a	10^{-18}
زيبتو	z	10^{-21}
يوكتا	y	10^{-24}

* μ حرف لاتيني (ميو)

بادئات الوحدة

في النظام المتري، تعرف الوحدات الصغيرة والكبيرة بمضاعفات العدد 10 للوحدة المعيارية، وهو ما يجعل عملية الحساب سهلة. وعليه، فإن 1 كيلو متر (km) يساوي 1000 m، و 1cm يساوي $\frac{1}{100}$m ، و1mm يساوي $\frac{1}{1000}$ m أو $\frac{1}{10}$ cm. وهكذا. يوضح (الجدول 1-4) البادئات سنتي (centi) وكيلو (kilo) وغيرها. ويمكن استعمال هذه البادئات ليس فقط لوحدات الطول، ولكن لوحدات أخرى مثل الحجم والكتلة، أو أي وحدة مترية أخرى. فعلى سبيل المثال، السنتيلتر (cL) يساوي $\frac{1}{100}$ من اللتر (L) والكيلوجرام يساوي 1000 g.

حل المسألة

استخدم دائماً مجموعة الوحدات المتوافقة مع بعضها.

النظام الدولي للوحدات

أنظمة الوحدات

عندما نتعامل مع القوانين والمعادلات الفيزيائية، فإنه من المهم استخدام مجموعة من الوحدات تتوافق مع بعضها. فعلى مرّ السنين استخدمت أنظمة وحدات عديدة. أما اليوم، فإن **النظام الدولي** هو المهم. ويرمز إلى هذا النظام بـ SI من الفرنسية **Systeme International**. إن وحدة قياس الطول في هذا النظام هي المتر (meter) ووحدة قياس الكتلة هي الكيلوجرام (kilogram) ووحدة قياس الزمن هي الثانية (second)، ولهذا فقد سمي النظام (MKS).

أما النظام المعياري الآخر فهو نظام (**cgs**)، وفيه تكون الوحدات المعيارية للطول والكتلة والزمن هي السنتيمتر والغرام والثانية، على الترتيب، كما تم اختصارها في اسم النظام. في حين أن المعايير في **النظام الهندسي البريطاني** هي القدم للطول، والباوند للقوة، والثانية للزمن.

الجدول 1-5: الكميات الأساسية في النظام الدولي SI ووحداتها.

الكمية	الوحدة	اختصار الوحدة
الطول	متر	m
الزمن	ثانية	s
الكتلة	كيلوغرام	kg
التيار الكهربائي	أمبير	A
درجة الحرارة	كلفن	K
مقدار من المادة	مول	mol
شدة الإضاءة	كاندلا	cd

إن وحدات النظام الدولي (SI) هي الوحدات الرئيسة التي تستخدم في الوقت الحاضر في الأمور العلمية جميعها؛ لذا سوف نستخدم في هذا الكتاب وحدات SI على نحو حصري تقريبًا، بالرغم من أننا سوف نوضح وحدات النظام البريطاني و cgs لكميات مختلفة عندما نتطرق إليها.

الكميات الأساسية والمشتقة

تنقسم الكميات الفيزيائية إلى نوعين، أساسية ومشتقة، ومن ثَمَّ فإن الوحدات التي تناظر هذه الكميات تسمى أيضًا وحدات أساسية ووحدات مشتقة. يجب أن تعرف الكمية الأساسية بدلالة معيار. وللتبسيط يريد العلماء أقل عدد من الكميات الأساسية المحتملة لتتوافق مع الوصف الكامل لعالم الفيزياء، ولقد تبيّن أن عدد هذه الكميات سبعة والمستخدم منها في النظام الدولي (SI) موضح في (الجدول 1-5). ويمكن تعريف الكميات الأخرى بدلالة هذه الكميات الأساسية السبع*؛ ولذلك فإنها تعرف بالكميات المشتقة. ومن الأمثلة على الكميات المشتقة السرعةُ القياسيةُ؛ وهي عبارة عن المسافة مقسومة على الزمن اللازم لقطع تلك المسافة. يحتوي الجدول المثبت على الجانب الداخلي للغلاف الأمامي للكتاب على العديد من الكميات المشتقة ووحداتها بدلالة الوحدات الأساسية. ولتعريف أيّ كمية، سواء أكانت أساسية أم مشتقة، يمكننا تحديد قاعدة أو نهج ما، وهو ما يسمى بالتعريف العملي.

1-6 تحويل الوحدات

تحتوي أيّ كمية نقوم بقياسها كالطول، والسرعة القياسية، والتيار الكهربائي على عدد ووحدة قياس. وفي أغلب الأحيان تعطى كمية ما بوحدة قياس معينة، ثم يُطلب التعبير عنها بوحدات أخرى. لنفرض على سبيل المثال أننا قسنا عرض طاولة ووجد أنه يساوي 21.5 بوصة (inches) ونريد التعبير عنه بدلالة السنتيمتر. في مثل هذه الحالة، يجب أن نستخدم معامل تحويل كما يأتي:

$$1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm}$$

ويكتب بطريقة أخرى كما يأتي:

$$1 = 2.54 \text{ cm/in.}$$

وبما أن الضرب في واحد لا يغير أي شيء، فإن عرض الطاولة بالسنتيمتر يساوي:

$$21.5 \text{ inches} = (21.5 \cancel{\text{in.}}) \times \left(2.54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in.}}}\right) = 54.6 \text{ cm}.$$

لاحظ كيف تم حذف الوحدات. وهناك جدول في الصفحات التقديمية للكتاب يحتوي على تحويلات لوحدات مختلفة. والأمثلة الآتية توضح بعض التحويلات.

المثال 1-3 **أعلى القمم** ترتفع القمم الأربع عشرة الأعلى في العالم أكثر من 8000 m عن مستوى سطح البحر (الشكل 1-9 والجدول 1-6)، ولذلك تسمى بالقمم ذات الثمانية الآف متر. قمة ارتفاعها 8000 m عن مستوى سطح البحر، احسب ارتفاعها بالقدم.

النهج: تحتاج ببساطة إلى تحويل المتر الى قدم؛ ولذلك نبدأ بمعامل التحويل الدقيق أي 1 in. = 2.54 cm أي 1 in. = 2.5400 cm لأي عدد من الأرقام المعنوية

الإجابة: القدم يساوي 12 بوصة، ولذلك يمكن كتابة ما يلي:

$$1 \text{ ft} = (12 \cancel{\text{in.}})\left(2.54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in.}}}\right) = 30.48 \text{ cm} = 0.3048 \text{ m}$$

تم حذف الوحدات، والنتيجة التي حصلنا عليها صحيحية. ويمكن إعادة كتابة

الشكل 1-9 ثاني أعلى قمة في العالم (تسمى K2)، وهي أصعب قمة من بين القمم ذات الثمانية الآف متر. تظهر هذه القمة K2 من الجانب الشمالي (الصين)، والغلاف الخارجي للكتاب يظهرها من جهة الجنوب (باكستان). المثال 1-3.



تطبيق الفيزياء
أعلى قمم العالم

* الاستثناء الوحيد للزاوية (زوايا نصف قطرية - انظر الفصل الثامن والزاوية المجسمة (زوايا نصف قطرية مجسمة). حيث لا يوجد إجماع على ماهيه هذه الكميات، هل هي أساسية أم مشتقة؟

فهرست

الاختصار defn تعني: الصفحة المعنية تعطي تعريف الحدة fn تعني المرجع في ملاحظة أسفل الصفحة؛ pr تعني موجود في مسألة أو سؤال؛ ff تعني أيضًا الصفحات التالية



صورة الأرض التُقطت من على علو 36,000 km، وتم تحسينها باستخدام الحاسوب. وتظهر في الصورة الأمريكيتان الشمالية والجنوبية بوضوح، كما تظهر السماء من على هذا العلو سوداء اللون (أما لماذا نرى السماء زرقاء من سطح الأرض، فقد نوقش ذلك في الفصل 24). سوف نبدأ هذا الفصل بتعلم بعض الأساسيات عن العلم ونظرياته والقياس ووحداته.
وسنتعلم أيضًا كيفية إجراء التقدير بسرعة.

الفصل 1

مقدمة، القياس والتقدير

تُعدّ الفيزياء العلم الأساسي بين العلوم جميعها، وهو علم يتناول سلوك المادة وتركيبها. ويقسم مجال الفيزياء عادة إلى **الفيزياء الكلاسيكية** التي تتضمن الحركة، والسوائل، والحرارة، والصوت، والضوء، والكهرباء، والمغناطيسية، أما القسم الآخر فهو **الفيزياء الحديثة**، وتتضمن موضوعات النسبية، والتركيب الذري، والمادة المكثفة، والفيزياء النووية والجسيمات الأولية، والكونيات وفيزياء الفلك. وقبل البدء بدراسة الفيزياء نفسها، دعنا ننظر بإيجاز كيف أن هذا النشاط الشامل الذي يسمى (علمًا) ومن ضمنه الفيزياء يمارس في الحقيقية.

1-1 طبيعة العلم

إن الهدف الرئيس للعلوم جميعها بما فيها الفيزياء هو البحث عن ترتيب ما لمشاهداتنا للعالم من حولنا. يعتقد كثير من الناس أن العلم عملية ميكانيكية لجمع الحقائق وابتكار النظريات، ولكنه في الحقيقة ليس بهذه السهولة؛ فالعلم عمل مبدع يشبه من نواح عديدة الأعمال الإبداعية للعقل البشري.



الشكل 1-1 يقف أرسطو، الشخصية الرئيسة (يرتدي الملابس الزرقاء) في هذه الصورة عند أعلى الدرج (والشخص الذي بجانبه أفلاطون). رسم هذه الصورة رفائيل سنة 1510 تقريبًا، وهي تمثل عصر النهضة المشهور لمدرسة أثينا. ويظهر في هذه الصورة التي تُعدّ إحدى التحف الفنية إقليدس (يرسم دائرة عند أسفل يمين الصورة) وبطليموس (أقصى يمين الصورة) وكذلك فيثاغورس وسقراط وديوجينس.

المشاهدة والتجربة

من أهم ميزات العلم **مشاهدة** الأحداث وملاحظتها، ويتضمن ذلك تصميم التجارب وإجراءها. وتتطلب المشاهدة خيالًا واسعًا؛ حيث لا يمكن للعلماء أبداً تضمين كل شيء في وصف مشاهداتهم. ولذلك يجب على العلماء وضع أحكام حول طبيعة الأشياء التي لها علاقة بمشاهداتهم وتجاربهم. فعلى سبيل المثال، كيف استطاع عالمان عظيمان مثل أرسطو (384-322 قبل الميلاد – الشكل1-1) وغاليليو (1564-1642 الشكل 2-17) تفسير الحركة على سطح أفقي. لقد لاحظ أرسطو أن الأجسام التي على سطح الأرض (أو على سطح طاولة)، تتأثر بداية بقوة دفع، ومن ثَمَّ تتباطأ دائمًا، وأخيرًا تقف. وهكذا استنتج أرسطو أن الحالة الطبيعية للأجسام هي السكون. أعاد غاليليو دراسة الحركة الأفقية في بداية العام 1600s، وتخيل أنه إذا أهمل الاحتكاك بين الجسم الذي تؤثر فيه القوة والسطح الأفقي الذي يتحرك عليه الجسم فإن الجسم يستمر في حركته على نحو غير محدد من غير أن يتوقف. واستنتج من ثَمَّ أن الحالة الحركية للجسم هي حالة طبيعية مثل تلك التي يمتلكها في حالة السكون. وبهذا التصور، أوجد غاليليو مفهومنا الحديث للحركة (الفصول 4,3,2) بالرغم من أن غاليليو توصل إليه نظريًّا من غير أن يتخلص من الاحتكاك في أثناء التجربة.

الحركة أمر طبيعي مثل السكون

النظريات

إن المشاهدة، والتجريب الدقيق، والقياس هي جانب من العملية العلمية، أما الجانب الآخر فهو الاختراع أو إيجاد **النظريات** التي تفسر المشاهدات وترتبها. فلا يمكن أن تُشتق النظريات مباشرة من المشاهدات، ولكن المشاهدات قد توحي بنظرية. ويتم قبول النظريات أو رفضها على أساس التجربة والمشاهدة.

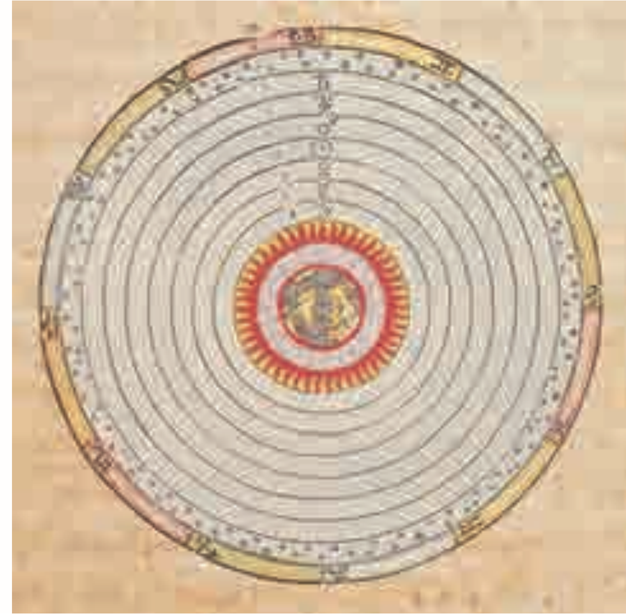
وتعد النظرية إلهامًا من العقل البشري، فعلى سبيل المثال، إن الفكرة التي تقول بأن المادة مكونة من ذرات (النظرية الذرية) لم يتم التوصل إليها من خلال المشاهدة المباشرة للذرات- فلا يمكن رؤية الذرات مباشرة، ولكنها نبعت من عقول مبدعة. وكذلك الحال، فإن نظرية النسبية والنظرية الكهرومغناطيسية للضوء وقانون نيوتن في الجذب العام كلها نتائج للخيال البشري.

يمكننا مقارنة نظريات العلم الرائعة كإنجازات إبداعية بالأعمال المهمة في الفن والأدب. ولكن كيف يختلف العلم عن الأعمال الإبداعية الأخرى؟ إن أحد أهم هذه الاختلافات هو أن العلم يشترط اختبار الأفكار والنظريات بالتجربة للتأكد من تنبؤاتها. ولكن النظريات لا تثبت بالاختبار، والسبب في ذلك عدم وجود جهاز قياس مثالي؛ أي أنه لا يمكن التأكد من صحة النظرية بالضبط. وعلاوة على ذلك لا يمكن اختبار النظرية لكل مجموعة من الظروف المحتملة. وعليه، فإنه لا يمكن إثبات أي نظرية على نحو مطلق. وفي الحقيقة فإن تاريخ العلم يخبرنا بأن هناك نظريات دامت أزمنة طويلة ثم حلت مكانها نظريات أخرى جديدة.

اختبار النظرية

قبول النظرية

يقبل العلماء النظرية الجديدة في بعض الحالات؛ لأن تنبؤاتها تتفق كمّيًا مع التجربة على نحو أفضل من تلك التي للنظرية القديمة.



(أ)

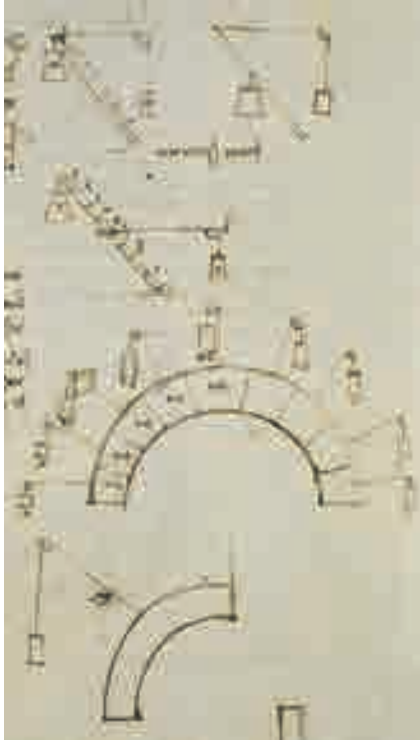


(ب)

الشكل 1-2 (أ) يمثّل وجهة نظر بطليموس التي تقول إن الأرض مركز الكون. لاحظ وجود العناصر الأربعة للقدماء في المركز، وهي: الأرض، والماء، والهواء (الغيوم حول الأرض) والنار. تمثل الدوائر مع الرموز القمر وعطارد، والزهرة، والشمس، والمريخ، والمشتري، وزحل، ثم النجوم الثابتة وعلامات للبروج. (ب) تمثيل وجهة نظر كوبرنيكوس للكون؛ حيث تبدو الشمس مركزًا له (انظر الفصل 5).

وتقبل النظرية الجديدة في حالات عديدة إذا قدمت تفسيرًا لعدد كبير من الظواهر أكثر مما قدمته النظرية القديمة؛ فعلى سبيل المثال، لم تكن نظرية كوبرنيكوس التي تعد الشمس مركز الكون (الشكل 1-2 ب) أكثر دقة من نظرية بطليموس التي ترى أن الأرض مركز الكون (الشكل 1-2 أ) من حيث التنبؤ بحركة الأجرام السماوية (الشمس، القمر، الكواكب). وقد كان لنظرية كوبرنيكوس نتائج لم تكن لنظرية بطليموس، مثل التنبؤ بمراحل ظهور كوكب الزهرة التي تشبه تلك التي للقمر. إن النظرية البسيطة والقيمة التي توحد العديد من الظواهر المتنوعة وتفسرها تكون أكثر فائدة بالنسبة للعالم. وهذه الميزة بالإضافة إلى الاتفاق الكمّي لها أثر كبير في قبول النظرية.

إن الميزة المهمة لأي نظرية هي كيف يمكن أن تتنبأ بالظواهر كميًّا وبفاعلية. ومن وجهة النظر هذه، فإن النظرية الجديدة تبدو في أغلب الأحيان تطويرًا بسيطًا للنظرية القديمة. وعلى سبيل المثال، تقدم نظرية آينشتاين النسبية تنبؤات تختلف قليلًا عن النظريات القديمة لغاليليو ونيوتن وخصوصًا في مواقف الحياة اليومية. ولكن تنبؤاتها أفضل في حالة السرعات العالية التي تقترب من سرعة الضوء. وليس التنبؤ الكمّي فقط هو النتيجة المهمة للنظرية، وإنما تغيُّر نظرتنا إلى العالم الذي يحيط بنا أيضًا؛ فقد تغيرت مفاهيمنا تمامًا عن الفضاء والزمن نتيجة لنظرية النسبية، فأصبحنا نرى الكتلة والطاقة كيانًا واحدًا (من خلال المعادلة المشهورة $E = mc^2$).



الشكل 1-3 دراسات على القوى في الإنشاءات قام بها ليوناردو دفنشي (1452-1519).

1-2 الفيزياء وعلاقتها مع المجالات الأخرى

لقد كان العلم لوقت طويل وحدة متكاملة تقريبًا ويعرف بالفلسفة الطبيعية. ولكن قبل قرن أو اثنين أصبحت الفروق بين الفيزياء والكيمياء وحتى علوم الحياة واضحة. وأما الفرق الواضح الذي نراه اليوم بين الفنون والعلوم فهو الفرق نفسه الذي كان سائدًا بينهما إلى قرون عدة خلت. ولا عجب في ذلك، إذ إن تطور الفيزياء أثّر في المجالات الأخرى وتأثر بها. لقد وجد على سبيل المثال أن دفاتر ملاحظات (الشكل 1-3) ليوناردو دفنشي - وهو باحث ومهندس، وأعظم فنان في عصر النهضة - تحتوي على أول مراجع للقوى التي تؤثر في البناء؛ على الرغم من رؤيتنا بأن هذا الموضوع يقع حاليًّا ضمن الفيزياء بالإضافة إلى علاقته بالعمارة وفن البناء.





(ب) (أ)

الشكل 1-4 (أ) بنيت هذه القناة الرومانية قبل 2000 سنة، وما زالت باقية مكانها. (ب) انهيار مركز هارتفورد المدني في عام 1978 بعد سنتين فقط على بنائه.

إن البداية المبكرة للبحث في الكهرباء - التي أدت إلى اكتشاف البطارية الكهربائية والتيار الكهربائي - بدأ بها عالم بوظائف أعضاء الجسم يُدعى لويجي جلفاني في القرن الثامن عشر. لاحظ جلفاني ارتعاش أرجل الضفادع استجابة لشرارة كهربائية تعرضت لها، ثم لاحظ أن العضلات تنقبض عندما تلامس معدنين مختلفين (الفصل 18). وقد سميت هذه الظاهرة في البداية *(كهرباء الحيوان)*، وبعد ذلك بقليل، أصبح واضحاً أن التيار الكهربائي يمكن أن ينشأ بغياب الحيوان.

تطبق الفيزياء على الكثير من المجالات

تستخدم الفيزياء في العديد من المجالات؛ فعلى سبيل المثال، قد يجد عالم الحيوان أن الفيزياء مفيدة في فهم كيف تتمكن بعض أنواع الكلاب والحيوانات الأخرى من العيش تحت الأرض من غير أن تختنق. كما أن المعالج الطبيعي يؤدي عمله بفاعلية أكبر إذا كان على اطلاع بمبادئ تأثير القوى داخل الجسم البشري ومركز ثقله. كما أن معرفة مبادئ تشغيل المعدات البصرية والإلكترونية مفيدة للغاية في مجالات عديدة. ويهتم علماء الحياة ومصممو العمارة على حد سواء بطبيعة الحرارة التي تفقدها الكائنات الحية أو تكسبها، حيث تنعكس سلبًا أو إيجابًا على راحتها. ربما ليس من الضروري أن يقوم مصمم بناء ما بحساب أبعاد الأنابيب المستخدمة في نظام التدفئة أو حتى حساب القوى التي يشتمل عليها البناء، ومعرفة مدى تحمّله ليبقى قائمًا (الشكل 1-4)، ولكن عليه أن يعرف المبادئ الأساسية لهذه التحليلات حتى يتمكن من عمل تصميم واقعي كي يتواصل على نحو فاعل مع المهندس الاستشاري والاختصاصيين الآخرين. ومن وجهة نظر نفسية أو جمالية أيضًا، فإن مصمم البناء يجب أن يكون مدركًا للقوى التي يشتمل عليها البناء؛ لأن عدم استقراره قد يسبب الإزعاج لأولئك الذين يجب أن يعيشوا أو يعملوا فيه. كما وترتبط الفيزياء على نحو واسع مع مجالات أخرى. وفي الفصول القادمة سنناقش العديد من مثل هذه التطبيقات في أثناء قيامنا بالهدف الرئيس، وهو شرح الفيزياء الأساسية.

3-1 النماذج والنظريات والقوانين

النماذج

عندما يحاول العلماء فهم مجموعة معينة من الظواهر، فإنهم يستعملون **نموذجًا** ما. ومن الناحية العلمية يمثل النموذج تناظراً أو تخيلاً عقلياً للظواهر بدلالة شيء آخر مألوف لدينا. ومن الأمثلة على ذلك النموذج الموجي للضوء، فلا يمكن أن نرى أمواج الضوء كما نرى أمواج الماء؛ ومن ثَمَّ فإنه من الضروري اعتبار الضوء مكوّناً من أمواج؛ لأن التجارب تدل على أن الضوء يسلك في جوانب عديدة سلوك أمواج الماء.

إن الغاية من النموذج هي تزويدنا بصورة بصرية أو عقلية تقريبية- شيء نعتمد عليه- عندما لا نستطيع فهم أو رؤية حقيقة ما يحدث. وفي أغلب الأحيان تمكننا النماذج من فهم الظواهر بعمق: فقد يؤدي التناظر مع نظام مألوف (على سبيل المثال موجات الماء في المثال السابق) إلى إجراء تجارب جديدة، وقد يزودنا أيضًا ببعض الأفكار حول ظواهر أخرى ذات علاقة من الممكن أن تحدث.

النظريات (مقابل النماذج)

وفي الحقيقة، هناك اختلاف بين **النظرية** والنموذج: فالنموذج يكون عادة بسيطًا نسبيًا، ويعطي تركيبًا مشابهًا للظواهر التي ندرسها. أما **النظرية** فهي أكثر شمولاً وتفصيلاً من النموذج، وتعطي تنبؤات كمية ذات دقة عالية وقابلة للاختبار أيضًا. وعلى أي حال، يجب عدم الخلط بين النموذج أو النظرية والنظام الحقيقي أو الظواهر نفسها.

القوانين

والمبادئ

يقدم العلماء **القانون** على نحو مختصر ومفيد، ولكن بعبارات عامة، عن كيفية سلوك الظواهر الطبيعية (على سبيل المثال قانون حفظ الطاقة). وأحيانًا يتم عرض العبارة من خلال معادلة أو علاقة رياضية تربط بين كميات (مثل قانون نيوتن الثاني $F = ma$). وحتى تسمى العبارة قانوناً، يجب أن يتم إثباتها تجريبيًا، وعلى مجال واسع من الظواهر التي نشاهدها. أما العبارات غير العامة، فيستخدم مصطلح قاعدة لوصفها (مثل قاعدة أرخميدس). تختلف القوانين العلمية التي تتصف بالطابع الوصفي عن القوانين السياسية التي تتسم بالطابع التصويري. فالقوانين السياسية تبيّن كيف يجب أن يكون سلوكنا، في حين أن القوانين العلمية تصف لنا سلوك الطبيعية كما هو، وليس كيف **يجب أن** يكون. وكما هو الحال بالنسبة للنظريات، لا يمكن اختبار القوانين لعدد غير محدد من الحالات المتنوعة والمحتملة؛ ولذلك لا يمكن التأكد من صحة أي قانون على نحو مطلق. ونستخدم مصطلح (قانون) عندما تختبر صحته على مجال واسع من الحالات، وكذلك عندما يتم فهم الحالات الاستثنائية وحدود تطبيقه على نحو واضح. ويفترض العلماء عادة صحة القوانين والنظريات كأساس لعملهم على أن يكونوا يقظين في حال اكتشاف معلومات جديدة قد تغير صحة أي قانون أو نظرية.

4-1 القياس وعدم اليقين (مبدأ الريبة) والأرقام المعنوية

يبذل العلماء قصارى جهودهم لفهم العالم الذي يحيط بنا من خلال إيجاد علاقات رياضية تربط بين كميات فيزيائية يمكن قياسها.

عدم اليقين (مبدأ الريبة)

هناك عدم يقين في كل قياس.

تمثل الأقيسة الصحيحة والدقيقة جزءاً مهماً من الفيزياء. ولعدم وجود قياس دقيق ومطلق، فهناك عدم يقين في كل قياس. ومن بين أهم مصادر عدم الدقة، عدا عن الأخطاء الشخصية، محدودية الدقة في أجهزة القياس وعدم القدرة على قراءتها بعد جزء ما من أصغر تدريج عليه. فإذا استخدمنا على سبيل المثال مسطرة مدرجة بالسنتيمترات لقياس عرض لوح خشبي (الشكل 1-5) فيمكننا القول بأن قراءتنا دقيقة لغاية 0.1 cm (1 mm) وهو أصغر تدريج على المسطرة، بالرغم من أن نصف هذه القيمة قد يكون صحيحاً. وسبب ذلك هو أننا لا نستطيع تقدير قراءة المسطرة بين أصغر تدريجات عليها، إضافة إلى أن صناعة المسطرة نفسها قد لا تكون دقيقة*.

الشكل 1-5 قياس عرض لوح خشبي باستخدام مسطرة مدرجة بالسنتيمترات. الدقة في القياس 1 mm ±.



* هناك فرق تقني بين دقة القياس وصحة القياس؛ حيث يشير المعنى الحرفي للدقة إلى إمكانية تكرار القياس باستعمال جهاز معين. فعلى سبيل المثال، إذا قست عرض لوح خشبي عدة مرات وحصلت على نتائج مثل 8.82 cm، 8.78 cm، 8.85 cm، 8.81 cm، (محاولاً في كل مرة تقدير أفضل قراءة بين العلامات التي تدل على 0.1 cm) في هذه الحالة يمكنك القول بأن الأقيسة تعطي دقة أفضل بقليل من 0.1 cm. أما صحة القياس فتدل على مدى قرب القيمة المقيسة من القيمة الحقيقة. وإذا صنعت المسطرة الموضحة في (الشكل1-5) بنسبة خطأ 2% فإن صحة قياسها لعرض اللوح الخشبي (حوالي 8.8 cm) تكون حوالي 2% من 8.8 cm، أو 0.2 cm ± تقريبًا. ويأخذ تقدير عدم التحديد بالحسبان كلاً من دقة القياس وصحته.

بيان عدم اليقين

عند عرض نتيجة قياس ما، فإنه من الضروري **بيان عدم اليقين في القياس**. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تكتب نتيجة قياس عرض اللوح الخشبي كما يأتي: 8.8 ± 0.1 cm ؛ حيث يمثل عدم اليقين في القياس بـ ± 0.1 cm (ويقرأ زائد أو ناقص 0.1 cm). ومن ثَمَّ فإن القيمة الحقيقية لعرض اللوح تقع على الأرجح بين 8.7 و 8.9 cm أما **النسبة المئوية لعدم اليقين** فتمثل النسبة بين عدم اليقين إلى القيمة المقيسة مضروبة في 100%. فإذا كان القياس 8.8 وعدم التحديد 0.1 cm فإن النسبة المئوية في عدم اليقين تساوي:

$$\frac{0.1}{8.8} \times 100\% \approx 1\%$$

حيث يعني الرمز $\approx$ يساوي تقريبًا.

افتراض عدم اليقين

وغالبًا ما تكتب القيمة المقيسة من غير الإشارة إلى عدم اليقين على نحو واضح. وفي مثل هذه الحالات نفترض أن عدم اليقين يمثل وحدة أو وحدات قليلة من آخر منزلة في القيمة المقيسة. وعليه، فإذا كانت القيمة المقيسة لعرض اللوح 8.8 cm فإن عدم اليقين يفترض أن يكون 0.1 cm أو 0.2 cm. إن من المهم في مثل هذه الحالة عدم كتابة القراءة 8.80 cm؛ لأن ذلك يتضمن أن عدم اليقين في حدود 0.01 cm ، وهذا يعني أنه من المحتمل أن يكون عرض اللوح بين 8.79 cm و 8.81 cm ولكنه في الحقيقة يقع بين 8.7 cm و 8.9 cm.

المثال المفاهيمي 1-1 **هل الماسة لك؟** طلبت إليك إحدى زميلاتك استعارة ماستك الثمينة كي تريها لعائلتها. وبما أنك قلقة على الماسة، فقد قمت بوزنها باستعمال ميزان، فكانت قراءته 8.17 g، وعدم اليقين في قراءته ± 0.05 g. وبعد أن أعادتها زميلتك في اليوم التالي، قمت بوزنها فكانت قراءة الميزان 8.09 g. فهل هذه هي ماستك؟

الإجابة: إن قراءات الميزان قياسات ليس من الضروري أن تعطي القيمة (الصحيحة) للكتلة؛ فكل قياس يمكن أن يكون أكثر أو أقل حتى 0.05 g أو ما يقاربها. إن الكتلة الحقيقة لماستك تقع على الأرجح بين 8.12 g و 8.22 g. والكتلة الحقيقة للماسة بعد أن أعادتها زميلتك تقع على الأرجح بين 8.04 g و 8.04 g. وهذه القيم تتداخل مع بعضها، لذلك ليس هناك سبب قوي للشك في أن الماسة التي أعيدت هي ليست ماستك على الأقل كما تظهرها قراءات الميزان.

الأرقام المعنوية

ما الارقام المعنوية؟

يسمى عدد الأرقام الموثوق بها في عدد ما بعدد **الأرقام المعنوية**؛ وعليه فهناك أربعة أرقام معنوية في العدد 23.21 cm أما عدد الأرقام المعنوية في العدد 0.062 cm فهو اثنان فقط (الأصفار التي في العدد الأخير هي مجرد حاملة مكان تبين أين يجب أن توضع الفاصلة العشرية). وقد لا يكون دائمًا عدد الأرقام المعنوية واضحاً. فإذا أخذنا على سبيل المثال العدد 80، فهل هناك رقم معنوي واحد أو رقمان؟ فإذا قلنا إن المسافة بين مدينتين **حوالي** 80 km ، فإن هناك رقماً معنوياً واحداً (وهو 8) لأن الصفر مجرد حامل مكان. أما إذا كانت المسافة 80 km **بالضبط** وبدقة من 1 إلى 2 km، فإن العدد 80 يحتوي على رقمين معنويين*. في حين إذا كانت المسافة 80 km بالضبط وعدم التحديد ± 0.1 km فإنها تكتب 80.0 km.

عند إجراء القياسات أو عمل الحسابات تجنب وضع أرقام كثيرة في الحل النهائي أكثر مما ينبغي. فعلى سبيل المثال، لحساب مساحة مستطيل أبعاده 11.3 cm في 6.8 cm فإن نتيجة الضرب 76.84 cm^2. ومن الواضح أن هذا الحل ليس دقيقًا لغاية 0.01 cm^2 لأنها من الممكن أن تكون (استعمل عدم اليقين المفترض لكل قياس) بين $11.2\ cm \times 6.7\ cm = 75.04\ cm^2$ و $11.4\ cm \times 6.9\ cm = 78.66\ cm^2$. وفي أحسن الأحوال يمكننا كتابة الحل 77cm^2 الذي يتضمن عدم تحديد يتراوح بين 1 و 2 cm^2. ومن ثَمَّ يجب إهمال الرقمين الآخرين (في العدد 76.84 cm^2) لأنهما ليسا رقمين معنويين. وكقاعدة عامة تقريبية (تؤخذ بالحسبان في حال عدم وجود تفاصيل عن عدم اليقين) يمكننا القول: «إن عدد الأرقام المعنوية في النتيجة النهائية لعملية الضرب أو القسمة يجب أن يساوي عددها في أقل الأعداد (المستعملة في العملية) أرقامًا معنوية» وفي مثالنا السابق نجد أن العدد 6.8 cm له أقل عدد من الأرقام المعنوية (اثنان فقط)؛ لذلك فإن النتيجة النهائية 76.84 cm^2 يجب أن تقرب إلى 77 cm^2.

حل المسألة

يجب أن يكون عدد الأرقام المعنوية في النتيجة النهائية مساويًا لأقل عدد أرقام معنوية في القيم المدخلة.

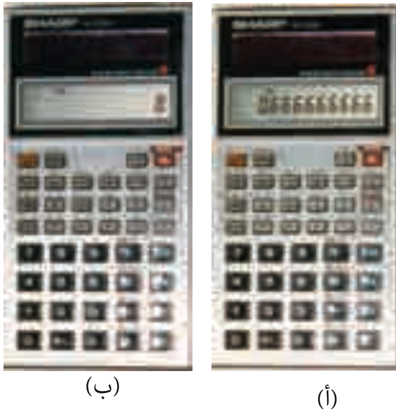
* إذا كان للعدد 80 رقمان معنويان، فإن بعضهم يفضل كتابته بوجود فاصلة عشرية؛ أي .80، ولكننا لا نقوم بذلك عادة، وعليه فإن عدد الأرقام المعنوية في العدد 80 يبقى غامضاً إلا إذا ذُكر شيء متعلق به، مثل كلمة حوالي (يعني 80 ± 10) أو قريباً جداً، أو بالضبط (يعني 80 ± 1).

التمرين أ: مستطيل أبعاده 4.5 cm في 3.25 cm، فإن مساحته بالشكل الصحيح تساوي:
(أ) $14.625\ cm^2$ (ب) $14.63\ cm^2$ (ج) $14.6\ cm^2$ (د) $15\ cm^2$

عند جمع الأعداد أو طرحها يجب ألا تكون النتيجة النهائية أكثر دقة من العدد الأقل دقة. على سبيل المثال: إن نتيجة طرح 0.57 من 3.6 هي 3.0 (وليس 3.03). عند استعمال آلة حاسبة، تذكر أن الأرقام التي تحصل عليها قد لا تكون كلها معنوية. فعند قسمة 2.0 على 3.0 يكون الحل المناسب 0.67 وليس 0.666666666. وهكذا فإن الأرقام الواردة في نتيجة ما يجب أن تكون كلها أرقامًا معنوية. و على أي حال. للحصول على أدق نتيجة يجب أن تضيف رقمًا معنويًا أو أكثر في أثناء إجراء الحسابات. ثم تقوم بتقريب النتيجة النهائية. *(عند استعمال آلة حاسبة يمكنك إبقاء كل الأرقام ضمن النتائج المتوسطة).* لاحظ كذلك أن الآلة الحاسبة تعطي أحيانًا أرقاماً معنوية أقل مما يجب. فعلى سبيل المثال، عند إجراء عملية الضرب 3.2×2.5 فإن الحل الذي قد تعطيه الآلة الحاسبة هو 8. ولكن الحل الصحيح يجب أن يشتمل على رقمين معنويين؛ لذلك فإن الحل المناسب هو 8.0 (الشكل 1-6).

تنويه !
تخطئ الآلات الحاسبة في الأرقام المعنوية.

حل المسألة
سجل العدد المناسب من الأرقام المعنوية فقط في النتيجة النهائية. أضف أرقاماً عشرية في أثناء عملية الحساب.


(ب) (أ)

الشكل 1-6 هاتان الحاسبتان تبينان عدداً غير صحيح للأرقام المعنوية. في (أ) 2.0 قسم على 3.0. النتيجة النهائية الصحيحة يجب أن تكون 0.67. في (ب) ضرب العدد 2.5 في 3.2. النتيجة الصحيحة 8.0.

التمرين (ب): هل للعددين 0.00324 و 0.00056 العدد نفسه من الأرقام المعنوية؟ توخَّ الحذر حتى لا تخلط بين الأرقام المعنوية وعدد المنازل العشرية.

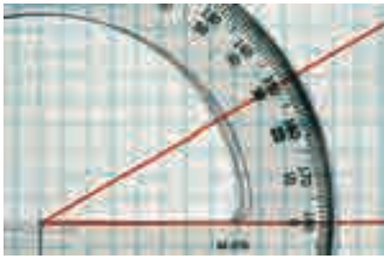
التمرين (جـ): بين عدد الأرقام المعنوية وعدد المنازل العشرية لكل عدد من الأعداد الآتية
(أ) 1.23 (ب) 0.123 (جـ) 0.0123

المثال المفاهيمي 1-2 **الأرقام المعنوية** استخدمت منقلة لقياس زاوية ما فكانت 30^o (الشكل 1-7) . (أ) ما عدد الأرقام المعنوية الذي تدونه لهذا القياس؟
(ب) استخدم آلة حاسبة لإيجاد جيب تمام الزاوية التي قمت بقياسها.

الحل (أ) إذا نظرت إلى المنقلة، فسترى أن الدقة في قياسك لزاوية ما حوالي درجة واحدة (بالتأكيد ليس 0.1^o)، لذلك يمكنك أن تدوّن رقمين معنويين؛ أي 30^o (وليس 30.0^o). (ب) إذا أدخلت $\cos 30^o$ إلى آلة حاسبة فستحصل على رقم مثل 0.866025403. على أي حال، بما أن الزاوية التي أدخلتها مكونة من رقمين معنويين فإن جيب تمام هذه الزوية يكتب بالشكل الصحيح 0.87؛ أي يجب أن تقرب إجابتك إلى رقمين معنويين.

ملحوظة: سنناقش في (الفصل 3) الدوال المثلثية، مثل جيب التمام.

الشكل 1-7 المثال 1-2 استعمال منقلة لقياس زاوية ما.



التدوين العلمي

تكتب الأعداد عمومًا بدلالة القوى للعدد عشرة أو بالتدوين العلمي، فعلى سبيل المثال يكتب العدد 36,900 هكذا 3.69×10^4 والعدد 0.0021 هكذا 2.1×10^{-3}. ومن فوائد التدوين العلمي (تمت مناقشته في الملحق أ) أنه يسمح لعدد الأرقام المعنوية أن يظهر على نحو واضح. ليس واضحًا فيما إذا كان العدد 36,900 يشتمل على ثلاثة أو أربعة أو خمسة أرقام معنوية. ويمكن تجنب مثل هذا الغموض باستخدام التدوين لقوى العدد عشرة: إذا كان العدد معروفاً بدقة ثلاثة أرقام معنوية فيُكتب 3.69×10^4، ولكن إذا كان معروفاً بدقة أربعة أرقام فيُكتب 3.690×10^4.

* الخطأ المئوي

إن قاعدة الأرقام المعنوية هي للتقريب فقط، وفي بعض الحالات قد تقلل من تقدير دقة الحل. لقسمة 97 على 92، نجد أن:

$$\frac{97}{92} = 1.05 \approx 1.1.$$

إن كل عدد من العددين 97 و 92 له رقمان معنويان؛ ولذلك فإن القاعدة تعطي الحل 1.1. وبالرغم من ذلك فإن كل عدد من العددين 97 و 92 يتضمن على عدم يقين ±1 إذا لم يذكر عدم اليقين آخر. ومن ثَمَّ فإن 92 ± 1 و 97 ± 1 يتضمن كل منهما دقة حول 1% $(1/92 \approx 0.01 = 1\%)$. لكن النتيجة النهائية لرقمين معنويين هي 1.1 وتتضمن عدم يقين ± 0.1، وهو ما يمثل $0.1/1.1 \approx 0.1 \approx 10\%$. وفي مثل هذه الحالة من الأفضل إعطاء الحل كما هو ودون تقريب؛ أي: 1.05 (الذي يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية). لماذا؟ لأن 1.05 يتضمن عدم تحديد ± 0.01 وهو ما يمثل $0.01/1.05 \approx 0.01 \approx 1\%$ أي عدم اليقين نفسه الذي للأعداد الأصلية 92 و 97.

اقتراح : استخدم قاعدة الأرقام المعنوية، وخذ بالحسبان النسبة المئوية في عدم اليقين، ثُمَّ أضف رقماً عشرياً إضافياً إذا كان ذلك يقدم تقديراً أكثر واقعية لعدم اليقين هذا.

5-1 الوحدات والمعايير والنظام الدولي للوحدات

تقاس أي كمية بالنسبة إلى معيار أو **وحدة معينة**، ويجب تحديد هذه الوحدة بجانب القيمة العددية للكمية المقيسة؛ فعلى سبيل المثال: يمكننا قياس الطول بوحدات مثل البوصات، أو الأقدام، أو الأميال، أو في النظام المتري بالسنتيمترات أو الأمتار، أو الكيلومترات. إن تحديد طول جسم معين بالعدد 18.6 يكون بلا معنى؛ حيث يجب ذكر وحدة القياس التي تتبع العدد، لأن 18.6 مترًا تختلف تمامًا عن 18.6 بوصة أو عن 18.6 ميلمترًا. إن أي وحدة قياس نستعملها مثل المتر للمسافة أو الثانية للزمن، نحتاج إلى تعريفها بواسطة معيار معين يُعرّف **بالضبط** ما هو المتر أو الثانية. ومن المهم أن تكون المعايير التي تم اختيارها في متناول اليد، بحيث يمكن لأي شخص يحتاج إلى إجراء قياس دقيق جدًا الرجوع إلى المعيار الذي في المختبر.

الطول

معيار الطول (المتر)

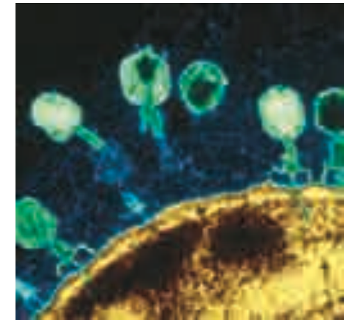
إن أول معيار دولي هو **المتر** (اختصاراً m)؛ حيث وُضع معيارٌ **للطول** من قبل الأكاديمية الفرنسية للعلوم في 1790. ولقد اختير المتر المعياري في الأصل كي يمثل جزءاً من عشرة ملايين من المسافة التي بين خط الاستواء وأي من القطبين*، وقد صمم قضيب من البلاتين ليمثل هذا الطول. (المتر الواحد تقريبًا يساوي المسافة من رأس أنفك إلى رأس أصابعك عندما تكون الذراع واليد ممدودتين إلى الخارج). وفي عام 1889، عُرّف المتر بدقة أكثر ليمثل المسافة بين علامتين محفورتين بدقة على قضيب خاص من سبيكة البلاتين والأريديوم. وفي عام 1960، أُعيد تعريف المتر للحصول على دقة كبيرة وقابلية إنتاج عالية ليساوي 1,650,763.73 طول موجة من ضوء برتقالي معين ينبعث من غاز الكربتون 86. وفي عام 1983، أُعيد تعريف المتر مرة أخرى، ولكن هذه المرة بدلالة سرعة الضوء (أفضل قيمة مقيسة لسرعة الضوء بدلالة التعريف القديم للمتر هي 299,792,458 m/s مع عدم يقين 1 m/s). والتعريف الجديد «المتر هو طول المسار الذي يقطعه الضوء في الفراغ خلال مدّة زمنية مقدارها 1/299,792,458 من الثانية»**.

إن الوحدات البريطانية للطول (بوصة، قدم، ميل) تُعرف الآن بدلالة المتر. فالبوصة مثلًا تعرف بدقة على أنها تساوي 2.45 سنتيمترًا (يكتب اختصارًا cm، حيث إن 1 cm = 0.01 m). وهناك معاملات تحويل أخرى موجودة في الجدول الذي على الجانب الداخلي للغلاف الأمامي لهذا الكتاب. ويبين (الجدول 1-1) بعض الأطوال، من الصغيرة جدًا إلى الكبيرة جدًا، مقربة إلى أقرب قوة من قوى العدد 10. انظر أيضًا إلى (الشكل 1-8).

الجدول 1-1: بعض الأطوال والمسافات المثالية (رُتبة المقدار)

الطول (أو المسافة)	الأمتار (تقريبًا)
النيوترون أو البروتون (نصف قطر)	10^{-15} m
الذرة	10^{-10} m
الفيروس [انظر الشكل 1-8 أ]	10^{-7} m
الورقة (سُمك)	10^{-4} m
عرض أصبع اليد	10^{-2} m
طول ملعب كرة القدم	10^{2} m
ارتفاع قمة إفرست [انظر الشكل 1-8 ب]	10^{4} m
قطر الأرض	10^{7} m
الأرض إلى الشمس	10^{11} m
الأرض إلى أقرب نجم	10^{16} m
الأرض إلى أقرب مجرة	10^{22} m
الأرض إلى أبعد مجرة مرئية	10^{26} m

الشكل 1-8 بعض الأطوال: (أ) فيروسات (طولها حوالي 10^{-7} m) تهاجم خلية. (ب) ارتفاع قمة إفرست بدلالة القوة عشرة هو 10^{4} m (ولكي نكون دقيقين فإن الارتفاع 8850 m).



(أ)



(ب)

* تدل الأقيسة الحديثة لمحيط الأرض على أن الطول الذي قصد أقل بحوالي جزء من خمسين من 1%.

** بهذا التعريف الجديد للمتر، فإن القيمة الدقيقة لسرعة الضوء في الفراغ تساوي 299,792,458 m/s.

الجدول 1-2 : بعض الفترات الزمنية المثالية

المدّة الزمنية	الثواني (تقريبًا)
عمر جسيم أصغر من الذرة / غير مستقر	10^{-23} s
عمر عناصر مشعة	10^{-22} s $-$ 10^{28} s
عمر الميون	10^{-6} s
الزمن بين نبضات قلب الإنسان	10^{0} s (= 1 s)
اليوم	10^{5} s
السنة	3×10^{7} s
مدة حياة الإنسان	2×10^{9} s
التاريخ المسجل	10^{11} s
الجنس البشري على الأرض	10^{14} s
الحياة على الأرض	10^{17} s
عمر الكون	10^{18} s

الجدول 1-3 : بعض الكتل

الجسم	كيلوغرام(تقريبًا)
الإلكترون	10^{-30} kg
البروتون/ النيوترون	10^{-27} kg
جزيء DNA	10^{-17} kg
البكتيريا	10^{-15} kg
البعوضة	10^{-5} kg
الخوخ	10^{-1} kg
الإنسان	10^{2} kg
السفينة	10^{8} kg
الأرض	6×10^{24} kg
الشمس	2×10^{30} kg
المجرة	10^{41} kg

الزمن

إن الوحدة المعيارية **للزمن** هي **الثانية** (s)، ولسنوات عديدة عرفت الثانية بأنها تساوي 1/86,400 من متوسط اليوم الشمسي. وتعرف الثانية المعيارية الآن بدقة أكبر بدلالة تردد الإشعاع المنبعث من ذرات السيزيوم عند مرورها بين حالتين محدّدتين. [وبالتحديد، فإن الثانية الواحدة تعرف على أنها الزمن الذي يستغرقة هذا الإشعاع لعمل 9,192,631,770 ذبذبات]. ومن هذا التعريف، نجد أن هناك 60s في كل دقيقة (min) و60 دقيقة في كل ساعة (h). يبين (الجدول 1-2) مجالاً من الحقب الزمنية المقيسة مقربة إلى أقرب قوة للأساس عشرة.

الكتلة

إن الوحدة **المعيارية** للكتلة هي **الكيلوجرام** (kg). والكتلة المعيارية هي أسطوانة مصنوعة من البلاتين والأريديوم، وتعرف كتلتها بالضبط لتساوي 1 kg، وهي محفوظة في المركز الدولي للقياس والأوزان قرب باريس في فرنسا. يبين (الجدول 1-3) الكتل [وللغايات العلمية، فإن 1kg يزن تقريبًا 2.2 باوند (lb) على سطح الأرض]. وعندما نتعامل مع الذرات والجزيئات فإننا نستخدم وحدة الكتلة الذرية الموحدة (u) ونعبر عنها بدلالة الكيلوغرام كما يأتي:

$$1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

وفي الفصول اللاحقة، سوف نناقش تعريفات وحدات معيارية لكميات فيزياء أخرى.

بادئات الوحدة

في النظام المتري، تعرف الوحدات الصغيرة والكبيرة بمضاعفات العدد 10 للوحدة المعيارية، وهو ما يجعل عملية الحساب سهلة. وعليه، فإن 1 كيلو متر (km) يساوي 1000 m، و 1cm يساوي $\frac{1}{100}$m ، و1mm يساوي $\frac{1}{1000}$ m أو $\frac{1}{10}$ cm وهكذا. يوضح (الجدول 1-4) البادئات سنتي (centi) وكيلو (kilo) وغيرها. ويمكن استعمال هذه البادئات ليس فقط لوحدات الطول، ولكن لوحدات أخرى مثل الحجم والكتلة، أو أي وحدة مترية أخرى. فعلى سبيل المثال، السنتيلتر (cL) يساوي $\frac{1}{100}$ من اللتر (L) والكيلوجرام يساوي 1000 g.

الجدول 1-4: البادئات المترية (SI)

البادئة	الاختصار	القيمة
يوتا	Y	10^{24}
زيتا	Z	10^{21}
إكسا	E	10^{18}
بتا	P	10^{15}
تيرا	T	10^{12}
جيجا	G	10^{9}
ميجا	M	10^{6}
كيلو	k	10^{3}
هكتو	h	10^{2}
ديكا	da	10^{1}
ديسي	d	10^{-1}
سنتي	c	10^{-2}
ملي	m	10^{-3}
ميكرو *	μ	10^{-6}
نانو	n	10^{-9}
بيكو	p	10^{-12}
فيمتو	f	10^{-15}
آتو	a	10^{-18}
زيبتو	z	10^{-21}
يوكتو	y	10^{-24}

* μ حرف لاتيني (ميو)

أنظمة الوحدات

عندما نتعامل مع القوانين والمعادلات الفيزيائية، فإنه من المهم استخدام مجموعة من الوحدات تتوافق مع بعضها. فعلى مرّ السنين استخدمت أنظمة وحدات عديدة. أما اليوم، فإن **النظام الدولي** هو المهم. ويرمز إلى هذا النظام بـ SI من الفرنسية **Systeme International**. إن وحدة قياس الطول في هذا النظام هي المتر (meter) ووحدة قياس الكتلة هي الكيلوجرام (kilogram) ووحدة قياس الزمن هي الثانية (second)، ولهذا فقد سمي النظام (MKS).

أما النظام المعياري الآخر فهو نظام (**cgs**)، وفيه تكون الوحدات المعيارية للطول والكتلة والزمن هي السنتيمتر والغرام والثانية، على الترتيب، كما تم اختصارها في اسم النظام. في حين أن المعايير في **النظام الهندسي البريطاني** هي القدم للطول، والباوند للقوة، والثانية للزمن.

حل المسألة

أستخدم دائماً مجموعة الوحدات المتوافقة مع بعضها.

النظام الدولي للوحدات

إن وحدات النظام الدولي (SI) هي الوحدات الرئيسة التي تستخدم في الوقت الحاضر في الأمور العلمية جميعها؛ لذا سوف نستخدم في هذا الكتاب وحدات SI على نحو حصري تقريبًا، بالرغم من أننا سوف نوضح وحدات النظام البريطاني و cgs لكميات مختلفة عندما نتطرق إليها.

الجدول 1-5: الكميات الأساسية في النظام الدولي SI ووحداتها.

الكمية	الوحدة	اختصار الوحدة
الطول	متر	m
الزمن	ثانية	s
الكتلة	كيلوغرام	kg
التيار الكهربائي	أمبير	A
درجة الحرارة	كلفن	K
مقدار من المادة	مول	mol
شدة الإضاءة	كاندلا	cd

الكميات الأساسية والمشتقة

تنقسم الكميات الفيزيائية إلى نوعين، أساسية ومشتقة، ومن ثَمَّ فإن الوحدات التي تناظر هذه الكميات تسمى أيضًا وحدات أساسية ووحدات مشتقة. يجب أن تعرف الكمية الأساسية بدلالة معيار. وللتبسيط يريد العلماء أقل عدد من الكميات الأساسية المحتملة لتتوافق مع الوصف الكامل لعالم الفيزياء، ولقد تبيّن أن عدد هذه الكميات سبعة والمستخدم منها في النظام الدولي (SI) موضح في (الجدول 1-5). ويمكن تعريف الكميات الأخرى بدلالة هذه الكميات الأساسية السبع*؛ ولذلك فإنها تعرف بالكميات المشتقة. ومن الأمثلة على الكميات المشتقة السرعةُ القياسيةُ؛ وهي عبارة عن المسافة مقسومة على الزمن اللازم لقطع تلك المسافة. يحتوي الجدول المثبت على الجانب الداخلي للغلاف الأمامي للكتاب على العديد من الكميات المشتقة ووحداتها بدلالة الوحدات الأساسية. ولتعريف أيّ كمية، سواء أكانت أساسية أم مشتقة، يمكننا تحديد قاعدة أو نهج ما، وهو ما يسمى بالتعريف العملي.

6-1 تحويل الوحدات

تحتوي أيّ كمية نقوم بقياسها كالطول، والسرعة القياسية، والتيار الكهربائي على عدد ووحدة قياس. وفي أغلب الأحيان تعطى كمية ما بوحدة قياس معينة، ثم يُطلب التعبير عنها بوحدات أخرى. لنفرض على سبيل المثال أننا قسنا عرض طاولة ووجد أنه يساوي 21.5 بوصة (inches) ونريد التعبير عنه بدلالة السنتيمتر. في مثل هذه الحالة، يجب أن نستخدم معامل تحويل كما يأتي:

$$1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm}$$

ويكتب بطريقة أخرى كما يأتي:

$$1 = 2.54 \text{ cm/in.}$$

وبما أن الضرب في واحد لا يغير أي شيء، فإن عرض الطاولة بالسنتيمتر يساوي:

$$21.5 \text{ inches} = (21.5 \cancel{\text{in.}}) \times \left(2.54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in.}}}\right) = 54.6 \text{ cm}.$$

لاحظ كيف تم حذف الوحدات. وهناك جدول في الصفحات التقديمية للكتاب يحتوي على تحويلات لوحدات مختلفة. والأمثلة الآتية توضح بعض التحويلات.

المثال 1-3 أعلى القمم ترتفع القمم الأربع عشرة الأعلى في العالم أكثر من 8000 m عن مستوى سطح البحر (الشكل 1-9 والجدول 1-6)، ولذلك تسمى بالقمم ذات الثمانية الآف متر. قمة ارتفاعها 8000 m عن مستوى سطح البحر، احسب ارتفاعها بالقدم.

النهج: نحتاج ببساطة إلى تحويل المتر الى قدم؛ ولذلك نبدأ بمعامل التحويل الدقيق 1 in. = 2.54 cm أي أن 1 in. = 2.5400 cm لأي عدد من الأرقام المعنوية

الإجابة: القدم يساوي 12 بوصة، ولذلك يمكن كتابة ما يلي:

$$1 \text{ ft} = (12 \cancel{\text{in.}})\left(2.54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in.}}}\right) = 30.48 \text{ cm} = 0.3048 \text{ m}$$

تم حذف الوحدات، والنتيجة التي حصلنا عليها صحيحة. ويمكن إعادة كتابة

الشكل 1-9 ثاني أعلى قمة في العالم (تسمى K2)، وهي أصعب قمة من بين القمم ذات الثمانية الآف متر. تظهر هذه القمة K2 من الجانب الشمالي (الصين)، والغلاف الخارجي للكتاب يظهرها من جهة الجنوب (باكستان). المثال 1-3.



تطبيق الفيزياء
أعلى قمم العالم

* الاستثناء الوحيد للزاوية (زوايا نصف قطرية - انظر الفصل الثامن والزاوية المجسمة (زوايا نصف قطرية مجسمة). حيث لا يوجد إجماع على ماهيه هذه الكميات، هل هي أساسية أم مشتقة؟.

هذه المعادلة لنحصل على عدد الأقدام في كل متر واحد

$$1\ \text{m} = \frac{1\ \text{ft}}{0.3048} = 3.28084\ \text{ft}.$$

نضرب الآن هذه المعادلة في $8{,}000.0$ (لنحصل على خمسة أرقام معنوية).

$$8{,}000.0\ \text{m} = (8{,}000.0\ \text{m})\left(3.28084\ \frac{\text{ft}}{\text{m}}\right) = 26{,}247\ \text{ft}.$$

لذا، فإن الارتفاع $8000\ \text{m}$ يساوي $26{,}247\ \text{ft}$ عن مستوى سطح البحر.

ملحوظة: كان بإمكاننا عمل هذا التحويل في سطر واحد.

$$8000\ \text{m} = (8000\ \text{m})\left(\frac{100\ \text{cm}}{1\ \text{m}}\right)\left(\frac{1\ \text{in.}}{2.54\ \text{cm}}\right)\left(\frac{1\ \text{ft}}{12\ \text{in.}}\right) = 26{,}247\ \text{ft}.$$

وهكذا، فإن مفتاح الحل هو الضرب في معاملات التحويل، كل منها يساوي واحدًا $(=1.0000)$ والتأكد من حذف الوحدات المتشابهة.

التمرين د: هناك أربع عشرة قمة فقط في العالم يزيد ارتفاعها عن ثمانية الآف متر (انظر إلى المثال 1-3). يوضح (الجدول 1-6) أسماء هذه القمم وارتفاع كل واحدة منها. تقع هذه القمم ضمن سلسلة جبال الهمالايا في كلّ من الهند، والباكستان، والتبت، والصين. حدد ارتفاع أعلى ثلاث قمم في العالم بوحدة القدم.

جدول 1-6: القمم ذات ثمانية آلاف متر

القمة	الارتفاع (m)
Mt. Everest	8850
K2	8611
Kangchenjunga	8586
Lhotse	8516
Makalu	8462
Cho Oyu	8201
Dhaulagiri	8167
Manaslu	8156
Nanga Parbat	8125
Annapurna	8091
Gasherbrum I	8068
Broad Peak	8047
Gasherbrum II	8035
Shisha Pangma	8013

المثال 1-4: مساحة رقاقة شبه موصلة رقاقة سيلكون مساحتها $1.25\ \text{in}^2$، أوجد مساحتها بـ cm 2.

النهج: نستخدم معامل التحويل $1\text{in}= 2.54\ \text{cm}$ نفسه. ولكن في هذه الحالة يجب أن نستخدمه مرتين.

الإجابة: بما أن $1\text{in.} = 2.54\ \text{cm}$ فإن

$$1\ \text{in.}^2 = (2.54\ \text{cm})^2 = 6.45\ \text{cm}^2$$ وهكذا نجد أن

$$1.25\ \text{in.}^2 = (1.25\ \text{in.}^2)\left(2.54\ \frac{\text{cm}}{\text{in.}}\right)^2 = (1.25\ \text{in.}^2)\left(6.45\ \frac{\text{cm}^2}{\text{in.}^2}\right) = 8.06\ \text{cm}^2$$

المثال 1-5: إذا كانت السرعة محددة بـ 55 ميلًا لكل ساعة (تكتب اختصارًا mph أو (mi/h)، فجد هذه السرعة: (أ) بالمتر لكل ثانية (m/s) (ب) بالكيلومتر لكل ساعة (km/h)؟

النهج: نستخدم معامل التحويل $1\text{in.} = 2.54\ \text{cm}$، مع الأخذ بالحسبان أن هناك $5280\ \text{ft}$ في كل 1mile و 12in في كل $1\ \text{ft}$، وكذلك فإن الساعة الواحدة تحتوي على عدد ثوانٍ مقداره $(60\ \text{min/h}) \times (60\ \text{s/min}) = 3600\ \text{s/h}$

الحل: (أ) يمكن أن نكتب الآن 1mile كما يأتي:

$$1\ \text{mi} = (5280\ \text{ft})\left(12\ \frac{\text{in.}}{\text{ft}}\right)\left(2.54\ \frac{\text{cm}}{\text{in.}}\right)\left(\frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}\right) = 1609\ \text{m}$$

لاحظ أن كل معامل تحويل يساوي واحدًا، وكذلك فإن الساعة الواحدة تحتوي على 3600s. لذلك فإن:

معامل التحويل =1

$$55\ \frac{\text{mi}}{\text{h}} = \left(55\ \frac{\text{mi}}{\text{h}}\right)\left(1609\ \frac{\text{m}}{\text{mi}}\right)\left(\frac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}}\right) = 25\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

حيث قرّبنا لرقمين معنويين.(ب) نستخدم الآن $1\ \text{mi} = 1609\ \text{m} = 1.609\ \text{km}$ ومن ثَمَّ فإن:

$$55\ \frac{\text{mi}}{\text{h}} = \left(55\ \frac{\text{mi}}{\text{h}}\right)\left(1.609\ \frac{\text{km}}{\text{mi}}\right) = 88\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

ملحوظة: إن تحويلات الوحدة هذه مفيدة وسهلة الاستعمال، ويمكنك دائمًا الحصول عليها من الجدول الذي في الصفحات التقديمية لهذا الكتاب.

التمرين هـ يقود شخص سيارته بسرعة $15\ \text{m/s}$ في منطقة السرعة فيها محددة بـ $35\ \text{mi/h}$، هل يتجاوز هذا الشخص السرعة المحددة؟

حل المسألة

يكون تحويل الوحدة خطأ إذا لم تحذف الوحدات مع بعضها.

عندما تغير الوحدات، يمكنك تجنب الخطأ في استعمال معاملات التحويل، وذلك بالتأكد من أن الوحدات قد اختُصرت على النحو الصحيح. فعلى سبيل المثال: عندما حوّلنا $1\ \text{mi}$ إلى $1609\ \text{m}$ في (المثال 1 - 5 أ)، إذا استخدمنا بالخطأ معامل التحويل $\frac{100\ \text{cm}}{1\ \text{m}}$ بدلاً من $\frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}$، فلا يمكن عندها حذف وحدات السنتيمتر، ومن ثَمَّ فإن الحل لا يمكن أن يكون بالأمتار.

7-1 رتبة المقدار: تقدير سريع

حل المسألة

كيف تعمل تقديرًا تقريبيًا

أحيانًا، نهتم فقط بالقيمة التقريبية لكمية ما، والسبب في ذلك أن حساب القيمة الصحيحة قد يحتاج إلى وقت أكثر مما يجب، أو أننا نحتاج إلى معلومات إضافية غير متوافرة. وفي حالات أخرى، ربما نريد عمل تقدير تقريبي فقط للتأكد من حساب صحيح حصلنا عليه من آلة حاسبة، وأننا لم نرتكب أخطاء عندما أدخلنا الأعداد.

ويمكن عمل تقدير تقريبي من خلال تقريب الأعداد جميعها، إلى رقم معنوي واحد مع قوته للعدد 10، وبعد إجراء عملية الحساب، احتفظ برقم معنوي واحد فقط. يسمى مثل هذا التقدير بـ (تقدير رتبة المقدار)، ويمكن أن يكون صحيحاً ضمن قوة من العدد 10، وفي أغلب الأحيان أفضل من ذلك. وفي الحقيقة فإن مصطلح رتبة المقدار يسمى أحيانًا قوة العدد 10.

تطبيق الفيزياء

تقدير الحجم (أو الكتلة) للبحيرة

أنظر الشكل **1-10**

المثال 1-6 قدّر حجم بحيرة

قدرّ كم تبلغ كمية الماء الموجود في بحيرة دائرية الشكل تقريبًا، كما في (الشكل 10-1أ)، وقطرها حوالي 1 km، إذا علمت أن متوسط عمقها حوالي 10 m.

النهج: لا توجد بحيرة دائرية تمامًا، كما لا يمكن أن يكون قاع البحيرة مستويًا، ولكننا نقوم بعملية تقدير فقط. لتقدير الحجم؛ نستخدم نموذجاً بسيطاً يمثل البحيرة على شكل أسطوانة، ثم نضرب متوسط عمق البحيرة في مساحة سطح قاعدتها الدائرية تقريبًا (الشكل 10-1 ب).

الحل: إن حجم الأسطوانة V يساوي حاصل ضرب الارتفاع h في مساحة قاعدتها: $V = h\pi r^2$، حيث r نصف قطر قاعدتها الدائرية.*

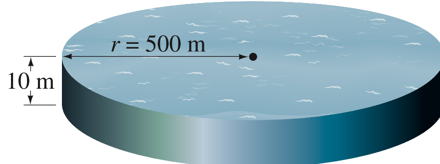
إن نصف القطر r يساوي $\frac{1}{2}\text{km} = 500\text{ m}$ ، ومن ثَمَّ فإن حجمها تقريبًا:

$$V = h\pi r^2 \approx (10\text{ m}) \times (3) \times (5 \times 10^2\text{ m})^2 \approx 8 \times 10^6\text{ m}^3 \approx 10^7\text{ m}^3$$

حيث قربت π إلى 3. لذلك فإن الحجم من رتبة 10^7m^3 أي عشرة مليون متر مكعب. وبسبب التقديرات التي قمنا بها في أثناء عملية الحساب، فإن تقدير رتبة المقدار 10^7m^3 ربما يكون أفضل من الرقم $8 \times 10^6\text{ m}^3$.



(أ)



(ب)

الشكل 1-10 (المثال 1-6 أ) كم كمية الماء في هذه البحيرة؟ (الصورة لإحدى بحيرات راي في نيفادا – كاليفورنيا).(ب) نموذج يمثل البحيرة على شكل أسطوانة. [كان يمكن القيام بخطوة إضافية أخرى لتقدير كتلة أو وزن كمية الماء في البحيرة. وحيث إن كثافة الماء 1000 kg/m^3 كما سنرى لاحقًا، فإن كتلة الماء في هذه البحيرة حوالي $(10^3\text{ kg/m}^3)(10^7\text{ m}^3) \approx 10^{10}\text{ kg}$، أي حوالي عشرة مليارات كيلو غرام أو عشرة ملايين طن متري. (الطن المتري يساوي 1000 kg؛ أي حوالي 2200 lbs، وعليه، فإنه أكبر قليلاً من الطن البريطاني الذي يساوي 2000 lbs).]

* هناك علاقات رياضية مثل هذه للحجم والمساحة وغيرها موجودة في الصفحات التقديمية لهذا الكتاب.

ملحوظة: للتعبير عن النتيجة التي حصلنا عليها بدلالة الجالون (gallon) الأمريكي، فإننا بحاجة إلى معرفة معامل تحويل، وهو $1L = 10^{-3}\text{m}^3 \approx \frac{1}{4}$ gallon الذي يمكن الحصول عليه من الجدول الموجود في الصفحات التقديمية للكتاب. وبذلك نجد أن ما تحتويه البحيرة من ماء بوحدة الجالون يساوي

$$(10^7\ \text{m}^3)(1\ \text{gallon}/4 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) \approx 2 \times 10^9\ \text{gallons}$$

حل المسألة

استخدم التماثل إن أمكن.

المثال 1-7 قدّر سمك صفحة

قدر سمك الصفحة الواحدة من هذا الكتاب.

النهج: قد تعتقد بداية أننا في حاجة إلى جهاز قياس خاص، مثل الميكرومتر (الشكل 1-11) لقياس سمك الصفحة، ومن الواضح أنه لا يمكننا استخدام المسطرة للقيام بذلك. وبحيلة بسيطة أو بالمصطلح الفيزيائي الإفادة من تماثل الصفحات، نفترض أن صفحات هذا الكتاب متماثلة ولها السمك نفسه.

الحل: يمكننا استخدام المسطرة لقياس سمك مئات من الصفحات في الحال. فإذا قمت بقياس سمك أول 500 صفحة من هذا الكتاب (من الصفحة 1 إلى الصفحة 500) فربما تحصل على قيمة قريبة من 1.5cm. لاحظ أن 500 صفحة تحسب على أساس وجه الصفحة وخلفها، وهو ما يعني أن هناك 250 ورقة، إذن، فسمك الورقة الواحدة يكون تقريبًا:

$$\frac{1.5\ \text{cm}}{250\ \text{pages}} \approx 6 \times 10^{-3}\ \text{cm} = 6 \times 10^{-2}\ \text{mm}$$

أي أقل من جزء من عشرة من مليمتر (0.1mm).



الشكل 1 - 11 المثال 1 - 7. ميكرومتر يستخدم لقياس سماكات صغيرة.

المثال 1-8 قدّر مجموع عدد نبضات القلب.

قدر مجموع عدد النبضات التي يقوم بها قلب الإنسان السليم خلال مدّة حياته.

النهج: إن معدل النبضات التي يقوم بها القلب السليم يساوي 70 نبضة لكل دقيقة. إلا أن هذا الرقم يرتفع كثيرًا في أثناء التمرين، وبذا قد يكون المتوسط المعقول مساويًا 80 نبضة لكل دقيقة.

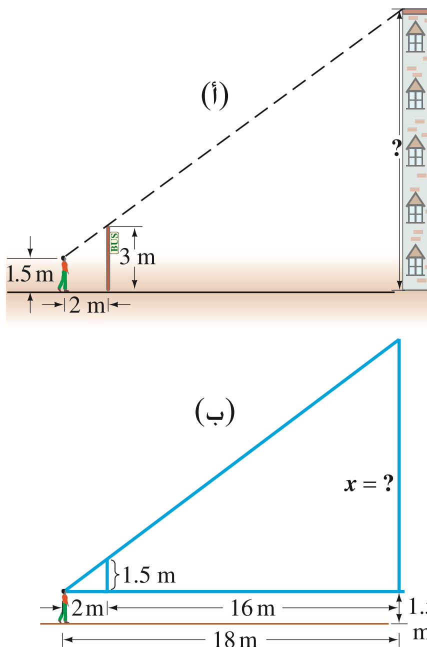
الحل: إذا افترضنا أن متوسط عمر الإنسان 70 سنة، وهو ما يعادل $\approx 2 \times 10^9\ \text{s}$ (انظر الجدول 1-2) فإن عدد النبضات يساوي

$$\left(80\ \frac{\text{beats}}{\text{min}}\right)\left(\frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}}\right)(2 \times 10^9\ \text{s}) \approx 3 \times 10^9,$$

أي حوالي 3 ترليونات نبضة.

دعنا الآن نأخذ مثالاً بسيطاً يبيّن كيف أن الرسم البياني مفيد للقيام بتقدير معين. لا يمكن التأكد على نحو كافٍ من أهمية عمل رسم بياني إلا عندما تحاول حل مسألة فيزيائية.

الشكل 1 - 12 المثال 1 - 9 الرسوم البيانية مفيدة في حل المسائل.



المثال 1-9 قدّر ارتفاع بواسطة علم حساب المثلثات.

قدر ارتفاع البناية الموضحة في (الشكل 1-12) بواسطة علم حساب المثلثات وبمساعدة عمود موقف الحافلات وصديقك.

النهج: اطلب من صديقك أن يقف بجانب العمود، وقدر ارتفاع العمود وليكن 3m. في الخطوة اللاحقة، ابتعد عن العمود حتى يصبح رأسه على خط واحد مع أعلى البناية، (الشكل 1-12أ). فإذا كان طولك 5 ft 6 in ، فإن عينيك سترتفع عن الأرض حوالي 1.5 m. وعندما مد صديقك ذراعيه جانبًا، لمست إحدى يديه العمود واليد الأخرى لمستك، فقدرت أن المسافة بينك وبين العمود تساوي 2m (الشكل 1-12 أ).

ثم بخطوة طويلة (≈1m) قست المسافة بين العمود وأسفل البناية فكانت 16 خطوة أو 16 m.

الحل: اعمل رسماً بيانياً كما في (الشكل 1-12 ب) مستخدمًا القياسات التي حصلت عليها. يمكنك قياس الجانب الأخير من المثلث مباشرة من الرسم البياني فيكون حوالي 13 m. أو يمكنك استخدام تشابه المثلثات للحصول على الارتفاع x:

$$\frac{1.5\ \text{m}}{2\ \text{m}} = \frac{x}{18\ \text{m}}$$ وبالتالي فإن: $x \approx 13\frac{1}{2}\ \text{m}$

أخيرًا، أضف ارتفاع عينيك عن سطح الأرض (1.5 m) لتحصل على النتيجة النهائية، فيكون ارتفاع البناية حوالي 15 m.

تطبيق الفيزياء

تقدير عدد ضابطي أوتار البيانو في مدينة ما.

وهناك أسلوب آخر للتقدير؛ فقد اشتهر العالم أنريكوفيرمي بشرحه لطلبة الفيزياء؛ حيث كان يطلب منهم تقدير عدد ضابطي أوتار البيانو في مدينة مثل شيكاغو أو سان فرانسيسكو. للحصول على تقدير تقريبي لرتبة المقدار لعدد الأشخاص الذين يقومون بضبط أوتار الآت البيانو اليوم في مدينة سان فرانسيسكو التي يبلغ عدد سكانها 700,000 نسمة، نحتاج إلى تقدير عدد الآت البيانو المستخدمة، وعدد مرات ضبط كل آلة، وكم يمكن لضابط الأوتار أن ينجز يوميًا. لتقدير عدد آلات البيانو في سان فرانسيسكو يجب ملاحظة أن ليس كل شخص يمتلك بيانو. دعنا نخمن أن عائلة واحدة من كل 3 عائلات تمتلك بيانو، وهذا يعني شخصًا واحدًا من كل 12، على فرض أن متوسط عدد أفراد العائلة 4 أشخاص. فإذا استخدمنا رتبة المقدار، فإن شخصًا يمتلك بيانو من كل 10 أشخاص. وهذا بالتأكيد أكثر معقولية من بيانو لكل 100 شخص، أو بيانو لكل شخص. فإذا أخذنا ذلك بالحسبان فإن هناك 70,000 بيانو في مدينة سان فرانسيسكو. يحتاج ضابط أوتار البيانو إلى ساعة أو ساعتين لضبط بيانو واحد، لذلك دعنا نقدر أنه يضبط 4 أو 5 آلات في اليوم. كما أن البيانو يحتاج إلى أن يضبط مرة واحدة كل ستة أشهر أو كل سنة، فلتكن مرة واحدة كل سنة. وهكذا نجد أن ضابط أوتار البيانو الذي يضبط 4 آلات يوميًا، لمدة 5 أيام أسبوعيًا، لمدة 50 أسبوعًا سنويًا يستطيع ضبط أوتار 1000 آلة سنويًا. وحيث إننا قدرنا أن عدد آلات البيانو في سان فراسيسكو 70,000، فمعنى ذلك أن هناك 70 ضابط أوتار في هذه المدينة. وهذا بالطبع تقدير تقريبي فقط*. يخبرنا هذا النهج بأنه لا بدّ وأن يكون هناك أكثر بكثير من 10 أشخاص يقومون بضبط أوتار البيانو، ولكنه بالتأكيد لا يصل إلى 1000. أما إذا كنت تقدر عدد ميكانيكيي السيارات، فإن تقديرك سيكون مختلفاً.

* 8-1 الأبعاد والتحليل البعدي**

عندما نتحدث عن أبعاد كمية فيزيائية، فإننا نعني نوع الوحدة المستخدمة لقياسها أو الكميات الأساسية المكونة لها. فعلى سبيل المثال، إن أبعاد المساحة هي دائمًا الطول تربيع، وتكتب اختصارًا باستعمال الأقواس المربعة $[L^2]$؛ حيث يمكن أن تكون الوحدة مترًا مربعًا، أو قدمًا مربعًا، أو سنتيمترًا مربعًا وهكذا. ومن جهة أخرى، يمكن قياس السرعة بوحدة km/h أو m/s أو mi/h ولكن أبعادها تبقى دائمًا الطول $[L]$ مقسومًا على الزمن $[T]$؛ أي $[L/T]$.

قد تختلف طريقة كتابة الصيغة الرياضية لكمية ما باختلاف الحالات، ولكن الأبعاد تبقى كما هي. فعلى سبيل المثال، إن مساحة مثلث قاعدته b وارتفاعه h هي $A = \frac{1}{2}bh$ ولكن مساحة دائرة نصف قطرها r هي $A = \pi r^2$. لاحظ اختلاف الصيغة الرياضية في الحالتين، إلا أن أبعاد المساحة في الحالتين تبقى كما هي $[L^2]$. كما يتم عادة تحديد أبعاد كمية ما بدلالة الكميات الأساسية وليس الكميات المشتقة. فعلى سبيل المثال: فإن القوة (كما سنرى لاحقًا) لها وحدة الكتلة $[M]$ مضروبة في وحدة التسارع $[L/T^2]$؛ أي أن أبعادها هي $[ML/T^2]$.

التحليل البعدي

يمكن أن تستعمل الأبعاد على أنها عامل مساعد للتحقق من العلاقات الفيزيائية، ومثل هذا الإجراء يعرف عادة **بالتحليل البعدي**.*** وفي الحقيقة، فإنه يمكن استخدام الأبعاد للتأكد من أن العلاقة الفيزيائية خطأ. وتطبق قاعدة بسيطة، وهي: تجمع الكميات أو تطرح فقط إذا كان لها الأبعاد نفسها (لا يمكن جمع السنتيمترات إلى الساعات)، ويتضمن ذلك أن الكميات التي على جانبي إشارة المساواة في علاقة فيزيائية يجب أن يكون لها الأبعاد نفسها. (في الحسابات العددية أيضًا، يجب أن يكون لطرفي المعادلة وحدات القياس نفسها).

لنفترض على سبيل المثال أنك قمت باشتقاق المعادلة $v = v_0 + \frac{1}{2}at^2$ حيث تمثل v سرعة الجسم بعد مرور زمن t على بدء الحركة، أما v_0 فتمثل السرعة الابتدائية للجسم في حين تمثل a تسارعه. دعنا الآن نختبر بعدية هذه المعادلة للكشف عن صحتها. لاحظ أن المعاملات مثل $\frac{1}{2}$ في هذه الحالة، لا تؤثر في اختبار البعدية.

* عند تدقيق الدليل التجاري لمدينة سان فرانسيسكو (جرت بعد إنهاء عملية الحساب) تبين أن عدد المسجلين 50. وقد يكون لدى الواحد منهم أكثر من موظف، ومن جهة أخرى، قد يقوم كل واحد منهم بتصليح آلة البيانو بالإضافة إلى ضبط أوتارها. وعلى أي حال من الأحوال فإن تقديرنا معقول.

** يمكن اعتبار بعض البنود في هذا الكتاب (مثل هذا البند) اختيارية حسب تقدير المدرس. انظر إلى المقدمة من أجل مزيد من التفاصيل.

*** التقنيات التي وضعت في الفقرات القليلة الآتية قد تبدو أكثر وضوحًا بعد أن تدرس بضعة فصول من هذا الكتاب. إن قراءة هذا البند الآن تعطيك فكرة عامة عن الموضوع، ويمكن أن تعود إليه عند الحاجة.

نكتب الآن المعادلة البعدية الآتية، مع ملاحظة أن بعدية السرعة هي $[L/T]$ وبعدية التسارع (كما سنرى لاحقًا) هي $[L/T^2]$:

$$\left[\frac{L}{T}\right] \stackrel{?}{=} \left[\frac{L}{T}\right] + \left[\frac{L}{T^2}\right][T^2]$$
$$\stackrel{?}{=} \left[\frac{L}{T}\right] + [L]$$

نلاحظ أن الأبعاد غير صحيحة؛ حيث إن الكميات التي على الجانب الأيمن للمعادلة ليس لها الأبعاد نفسها، وهكذا نستنتج أن خطأ ما قد ارتكب عند اشتقاق المعادلة الأصلية. وحتى لو كان هذا الاختبار البعدي صحيحاً فإنه لا يثبت أن المعادلة صحيحة. فعلى سبيل المثال: قد يكون العامل الحسابي (مثل $\frac{1}{2}$ أو 2π)، الذي ليس له بعدية خطأ. ومن ثَمَّ فإن الاختبار البعدي يستطيع أن يخبرنا فقط فيما إذا كانت المعادلة غير صحيحة، ولكنه لا يستطيع أن يخبرنا إنها صحيحة تمامًا. يمكن استخدام التحليل البعدي كاختبار سريع للكشف عن معادلة ما غير متأكد من صحتها. لنفترض على سبيل المثال أنك لا تتذكر فيما إذا كانت معادلة الزمن الدوري T لبندول (الزمن اللازم حتى يتأرجح ذهابًا وإيابًا مرة واحدة) بسيط طوله l هل هي $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ أم $T = 2\pi\sqrt{g/l}$ ؛ حيث g تسارع الجاذبية الأرضية وبعديتها مثل التسارع $[L/T^2]$. (سوف يتم اشتقاق المعادلة الصحيحة في (الفصل 11)، ولكن ما يهمنا الآن أنك لا تتذكر هل تشتمل على l/g او g/l)، يبين التحليل البعدي أن (l/g) هي الصحيحة كما يأتي:-

$$[T] = \sqrt{\frac{[L]}{[L/T^2]}} = \sqrt{[T^2]} = [T]$$

في حين أن (g/l) غير صحيحة؛ حيث إن:

$$[T] \neq \sqrt{\frac{[L/T^2]}{[L]}} = \sqrt{\frac{1}{[T^2]}} = \frac{1}{[T]}$$

لاحظ أن الثابت 2π ليس له أبعاد، وبذا لا يمكن اختبار بعديته.

ملخص

[تقدم الخلاصة التي في نهاية كل فصل من هذا الكتاب لمحة عامة ومختصرة عن الأفكار الرئيسة في الفصل. ولا يمكن أن تكون الخلاصة كافية لفهم المادة التي يمكن **تحقيقها** من خلال قراءة تفاصيل الفصل].

الفيزياء محاولة إبداعية مثل العلوم الأخرى؛ فهي ليست مجرد جمع للحقائق. تبتكر النظريات المهمة بهدف توضيح المشاهدات. وتقبل النظريات بعد أن يتم اختبارها من خلال مقارنة تنبؤاتها مع نتائج تجارب حقيقية؛ ولا يمكن على نحو عام إثبات النظرية بالمعنى المطلق.

في أغلب الأحيان، يبتكر العلماء نماذج للظواهر الفيزيائية، **فالنموذج** عبارة عن صورة ذهنية أو قياس تمثيلي يساعد على وصف الظواهر بدلالة شيء ما معروف مسبقًا. إن النظرية التي غالبًا ما تطوّر من نموذج هي أكثر عمقًا وتعقيدًا من النموذج البسيط.

القانون العلمي تعبير بسيط يوضع غالبًا على شكل معادلة تصف كمياً مجالاً واسعاً من الظواهر.

تؤدي **القياسات** دورًا حاسمًا في الفيزياء، ولكنها لا يمكن أن تكون دقيقة على نحو تام. إن من المهم التحديد في القياس، إما بتوضيحه مباشرة باستعمال الرمز ± و / أو الاحتفاظ فقط بالعدد الصحيح من الأرقام المعنوية.

تحدد **الكميات الفيزيائية** دائمًا بالنسبة إلى معيار معين أو وحدة قياس؛ حيث يجب دائمًا ذكر الوحدة المستعملة في القياس. إن الوحدات المستعملة حاليًا والمتفق عليها من قِبَل العلماء هي **وحدات النظام الدولي** (SI). وفي هذا النظام فإن الوحدة المعيارية للطول هي المتر، **وللكتلة الكيلو غرام**، وللزمن الثانية.

عند تحويل الوحدات يجب تدقيق معاملات التحويل جميعها حتى يكون اختصار الوحدات صحيحاً.

إن عمل تقريب مناسب **لتقدير** رتبة المقدار مفيد للغاية في العلوم وفي حياتنا اليومية كذلك.

[تشير أبعاد كمية ما إلى مجموعة الكميات الأساسية المكونة لها. فعلى سبيل المثال، فإن أبعاد السرعة هي: $\left[\frac{\text{الطول}}{\text{الزمن}}\right]$ أو $[L/T]$. إن تحليل الكميات المختلفة في علاقة رياضية بدلالة أبعادها فقط ***(نهج التحليل البعدي)*** يمكننا من الكشف عن صيغتها الصحيحة].

أسئلــة

.1 ما ميزات وعيوب استعمال قدم شخص ما معيارًا؟ ناقش الحالتين: (أ) قدم شخص معين (ب) قدم أي شخص. تذكر أن من فوائد المعايير الأساسية أنه يمكن الوصول إليها (ومن ثمَّ سهولة المقارنة معها) وأنها ثابته (لا تتغير) وغير قابلة للإتلاف، ويمكن إعادة إنتاجها.

.2 عندما تسافر على طريق سريع بين الجبال فربما تشاهد إشارات تدل على الارتفاع ((3000 ft) 914 m). يدعي منتقدو النظام المتري أن مثل هذه الأعداد تبين أن النظام المتري كثير التعقيد. كيف تعدل مثل هذه الإشارات لكي تكون متوافقة مع التحوّل إلى النظام المتري؟

.3 من الخطأ التفكير أنه كلما زاد عدد الأرقام التي تمثل إجابتك زادت دقتها، لماذا؟

.4 ما الخطأ في إشارة الطريق الآتية Memphis 7 mi (11.263 km)؟

.5 حتى يكون الحل كاملاً، فإنه من الضروري تحديد وحدات القياس، لماذا؟

.6 ناقش كيف يمكن أن تستعمل فكرة التماثل لتقدير عدد الكرات الزجاجية التي في وعاء سعته لتر واحد.

.7 قست نصف قطر دولاب فكان 4.16 cm، ولتحصل على قطر الدولاب؛ فقد ضربت نصف القطر في 2. فهل يجب أن تكتب النتيجة 8cm أم 8.32cm؟ برر إجابتك.

.8 اكتب جيب الزاوية 30.0^o بحيث تحتوي إجابتك على العدد الصحيح فقط من الأرقام المعنوية.

.9 تتطلب وصفة صنع السوفلية(حلوى فرنسية) أن تكون المكونات محددة بالضبط، أو أن السوفلية لن تنتفخ عند وضعها في الفرن. تحتاج إلى 6 بيضات كبيرة، وقد تتفاوت حجوم البيضات بمقدار 10% حسب مواصفات ما. ما الذي تفهمه من ذلك بخصوص الدقة المطلوبة في قياس المكونات الأخرى؟

.10 اكتب قائمة بالافتراضات التي تفيدك في تحديد عدد ميكانيكيي السيارات في: (أ) سان فرانسيسكو (ب) مدينتك الأصلية، ثم أجرِ عملية التقدير.

مسائـل

[رتبت المسائل التي في نهاية كل فصل حسب درجة صعوبتها؛ I أو II أو III؛ حيث يمثل الرمز (I) المسائل التي تكون سهلة، أما المستوى III فيمثل المسائل التي تعني على نحو أساسي نوعاً من التحدي لأذكى الطلاب. ورتبت المسائل كذلك حسب البنود، وهذا يعني أن القارئ يجب أن يقرأ ذلك البند وما سبقه وليس البند فقط؛ حيث تعتمد المسائل في أغلب الأحيان على المادة السابقة. يشتمل كل فصل أيضًا على مسائل عامة لم ترتب حسب البنود ولم تحدد درجة صعوبتها].

1-4 القياس وعدم اليقين والأرقام المعنوية

(ملحوظة: افترض في المسائل جميعها أن عددًا ما مثل 6.4 دقيق لغاية 0.1 ±، والعدد الذي مثل 950 دقيق لغاية 10 ± إلا إذا ذكر أن هذا العدد دقيق أو قريب من 950 وفي هذه الحالة نفترض أنه 950 ± 1).

.1 (I) يعتقد بأن عمر الكون حوالي 14 مليار سنة. اعتمد رقمين معنويين فقط واكتب هذا العدد بدلالة قوى العدد 10: (أ) بالسنوات (ب) بالثواني.

.2 (I) كم عدد الأرقام المعنوية في كل عدد من الأعداد الآتية: (أ) 214، (ب) 81.60، (جـ) 7.03، (د) 0.03، (هـ) 0.0086، (و) 3236، (ز) 8700؟

.3 (I) اكتب الأعداد الآتية بدلالة قوى العدد عشرة: (أ) 1.156، (ب) 21.8، (جـ) 0.0068، (د) 27.635، (هـ) 0.219، (و) 444.

.4 (I) اكتب الأعداد الآتية بحيث تحتوي على العدد الصحيح من الأصفار: (أ) 8.69×10^4، (ب) 9.1×10^3، (جـ) 8.8×10^{-1}، (د) 4.76×10^2، (هـ) 3.62×10^{-5}.

.5 (II) ما هي - تقريبًا - النسبة المئوية في عدم اليقين للقياس $1.57m^2$؟

.6 (II) ما النسبة المئوية في عدم اليقين للقياس 3.76 ± 0.25 m؟

.7 (II) يبلغ عدم اليقين في الحقب الزمنية التي تقاس بواسطة ساعة التوقيت حوالي 0.2 s، بسبب زمن رد الفعل البشري عند لحظات البدء والتوقف. ما النسبة المئوية في عدم اليقين لتوقيت ساعة اليد لكل قياس مما يأتي: (أ) 5 s، (ب) 50 s، (جـ) 5 min؟

.8 (II) اجمع ما يأتي:

$$(9.2 \times 10^3\ s) + (8.3 \times 10^4\ s) + (0.008 \times 10^6\ s)$$

.9 (II) جد حاصل ضرب 2.079×10^2 m في 0.082×10^{-1} آخذاً في الحسبان الأرقام المعنوية.

.10 (III) ما مساحة دائرة نصف قطرها 3.8×10^4 cm؟ وما قيمة عدم اليقين تقريبًا فيها؟

.11 (III) ما هي بالتقريب النسبة المئوية في عدم اليقين لحجم كرة الشاطئ الكروية التي نصف قطرها $r = 2.86 \pm 0.09$ m

1-5 الوحدات والمعايير والنظام الدولي للوحدات وتحويل الوحدات

.12 (I) اكتب الأعداد الآتية أعدادًا عشرية كاملة بالوحدات المعيارية: (أ) 286.6 mm، (ب) 85 µV، (جـ) 760 mg، (د) 60.0 ps، (هـ) 22.5 fm (و) 2.50 gigavolts .

.13 (I) اكتب ما يأتي مستخدمًا بادئات الوحدة التي في (الجدول 1-4): (أ) 1×10^6 v، (ب) 2×10^{-6} m، (جـ) 6×10^3 d، (د) 18×10^2 دولار، (هـ) 8×10^{-9} جزء.

.14 (I) حدد طولك بالأمتار وكتلتك بالكيلوجرام.

.15 (I) متوسط بعد الشمس عن الأرض يساوي 93 مليون ميل. كم يساوي هذا البعد بالأمتار؟ عبر عن ذلك مستخدمًا: (أ) قوى العدد عشرة (ب) بادئة مترية.

.16 (II) ما معامل التحويل بين كل مما يأتي: (أ) yd^2, ft^2 (ب) m^2 , ft^2؟

.17 (II) تسير طائرة بسرعة 950 km/h، كم تحتاج من الوقت لقطع مسافة 1.00 km.

.18 (II) يبلغ قطر الذرة حوالي 1.0×10^{-10} m (أ) كم يساوي بالبوصات؟ (ب) كم - تقريبًا - عدد الذرات التي توجد في خط طوله 1.0-cm؟

.19 (II) اكتب عملية الجمع الآتية مستخدمًا العدد الصحيح من الأرقام المعنوية:
$1.80 \text{ m} + 142.5 \text{ cm} + 5.34 \times 10^5\ \mu\text{m}$.

.20 (II) اكتب معامل التحويل بين كل من: (أ) km/h و mi/h، (ب) m/s و ft/s، (جـ) km/h و m/s.

.21 (II) بكم يزيد سباق الميل طولا (نسبة مئوية) عن سباق 1500-m ("الميل المتري").

.22 (II) السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة (بسرعة 2.998×10^8 m/s). (أ) كم مترًا في السنة الضوئية. (ب) الوحدة الفلكية (AU) هي متوسط المسافة من الشمس إلى الأرض، وتساوي 1.50×10^8 km وحدة فلكية توجد في السنة الضوئية؟ (جـ) ما سرعة الضوء بدلالة AU/h؟

.23 (III) يبلغ قطر القمر 3480 km (أ) ما مساحة سطح القمر؟ (ب) بكم مرة مساحة سطح الأرض أكبر من مساحة سطح القمر؟

7-1 تقدير رتبة المقدار

(ملحوظة: عند عمل تقدير تقريبي تذكر أنك تحتاج فقط إلى تقريب الأعداد الداخلة في عملية الحساب والنتيجة النهائية).

.24 (I) قدر رتبة المقدار (قوى العدد 10) لكل من: (أ) 2800 (ب) 86.30×10^2 (جـ) 0.0076 (د) 15.0×10^8.

.25 (II) قدر عدد الكتب التي يمكن أن ترتب في رفوف مكتبة كلية مساحة فضاء أرضيتها 3500 m^2. افترض ارتفاع 8 رفوف تتسع للكتب من الجانبين، ووجود ممرات عرض كل منها 1.5 m. افترض كذلك أن متوسط حجم الكتب مثل حجم هذا الكتاب.

.26 (II) قدر عدد الساعات التي يحتاج إليها عداء للعدو بمعدل (10 km/h) عبر الولايات المتحدة من نيويورك إلى كاليفورنيا.

.27 (II) قدر الزمن الذي يحتاج إليه شخص لجز عشب ملعب كرة قدم مستعملاً آلة جزّ العشب المنزلية (الشكل 1-13). افترض أن آلة جزّ العشب تتحرك بسرعة 1 km/h وعرضها 0.5 m.



الشكل 1-13 (المسألة 27).

.28 (II) قدر عدد لترات الماء التي يشربها الإنسان في حياته.

.29 (II) اعمل تقديرًا تقريبيًا لحجم جسمك بوحدة cm^3.

.30 (II) اعمل تقديرًا تقريبيًا لحساب النسبة المئوية للمساحة التي تشغلها النوافذ من مساحة الجدران الخارجية لأحد المنازل التي في ضاحيتك.

.31 (III) يدخل مطاط الإطارات التالفة إلى الغلاف الجوي كتلوث جزيئي. قدر كمية المطاط (بالكيلوجرام) التي تدخل في الهواء في الولايات المتحدة كل سنة. افترض أن سمك مطاط الإطار الجديد 1cm، وكثافة المطاط حوالي 1200 kg/m^3.

* 8-1 الأبعاد

* **.32** (II) تعطى سرعة جسم ما بالمعادلة $v = At^3 - Bt$، حيث يمثل الرمز t الزمن. ما أبعاد كل من A و B.

* **.33** (II) قام ثلاثة طلاب باشتقاق المعادلات الآتية: (أ) $x = vt^2 + 2at$ (ب) $x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ (جـ) $x = v_0 t + 2at^2$ حيث تمثل x المسافة المقطوعة، v_0 السرعة الابتدائية عندما $t = 0$، v سرعة الجسم بعد مرور الزمن t على حركته، a التسارع (m/s^2). أي من هذه المعادلات قد تكون صحيحة حسب اختبار البعدية؟

مسائل عامة

.34 تستعمل الأقمار الصناعية العالمية لتحديد المواقع (GPS) بدقة كبيرة. يعمل هذا النظام على تحديد المسافة بين المراقب وكل قمر من عدة أقمار تدور حول الأرض. إذا كانت المسافة بينك وبين أحد الأقمار 20,000 km، فما النسبة المئوية المطلوبة للدقة في المسافة إذا أردنا أن يكون عدم التحديد 2 m. كم عدد الأرقام المعنوية التي نحتاج إليها في المسافة؟

.35 تحفر شرائح الحاسوب (الشكل 1-14) على رقاقات دائرية من السيليكون سمكها 0.60 mm جُزئت من أسطوانة مصمتة من بلورة السيليكون طولها 30 cm. إذا كانت كل رقاقة تتسع 100 شريحة، فما أقصى عدد من الشرائح التي يمكن إنتاجها من أسطوانة كاملة؟


الشكل 1 - 14 (المسألة 35).
الرقاقة التي تمسكها اليد في أعلى الصورة تبين في الأسفل مكبرة ومضاءة بواسطة ضوء ملون. الجزء المرئي يمثل صفوفًا من الدارات المتكاملة (شرائح).

.36 (أ) كم ثانية في السنة؟ (ب) كم نانو ثانية في السنة؟ (جـ) كم سنة في الثانية؟

.37 تحتوي رئة الإنسان البالغ على حوالي 300 مليون فجوة صغيرة جدًا تسمى حويصلات. قدر متوسط قطر الحويصلة الواحدة.

.38 يعرف الهكتار الواحد على أنه يساوي 10^4 m^2، والفدان الواحد يساوي 4×10^4 ft^2. كم فدانًا في الهكتار الواحد؟

.39 استعمل (الجدول 1-3) لتقدير مجموع عدد البروتونات أو النيوترونات في: (أ) البكتيريا (ب) جزيء DNA (جـ) جسم الإنسان (د) مجرتنا.

.40 قدر العدد الكلي لجالونات البنزين التي تستهلك سنويًا من مجموع سائقي السيارات في الولايات المتحدة.

.41 قدر عدد كرات العلكة الموجودة في المكنة المبينة في (الشكل 1-15).

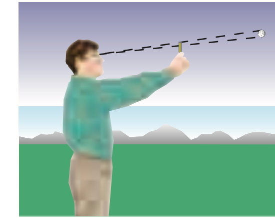

الشكل 1-15 (المسألة 41).
قدر عدد كرات العلكة الموجودة في المكنة.

42. تستعمل العائلة المكونة في المتوسط من أربعة أفراد 1200 L من الماء تقريبًا في اليوم. كم تفقد بحيرة تغطي مساحة منتظمة تبلغ $50\ km^2$ من عمقها في السنة عندما تزود الماء لبلدة عدد سكانها 40,000 نسمة؟ اعتبر فقط استعمال السكان للماء، وأهمل التبخر وغيره.

43. ما كبر الطن؛ أي ما حجم شيء ما وزنه طن واحد؟ قدر قطر صخرة وزنها طن. قبل كل شيء، خمن أبعاد الصخرة، هل تكون 1 ft في 3 ft أم أن حجمها مثل السيارة؟ [*تلميح:* كتلة الصخرة لكل وحدة حجم تساوي 3 أضعاف ذاك الذي للماء، والذي بالطبع يساوي 1kg لكل لتر ($10^3\ cm^3$) أو 62 lb لكل قدم مكعب].

44. هطل المطر على مدينة طولها 8 km وعرضها 5 km نتيجة لعاصفة مطرية قوية، فكان معدله 1.0 cm خلال 2 h. كم طنًا متريًا (1 طن متري = 10^3 kg) من الماء هطل على المدينة ؟ [كتلة $1\ cm^3$ من الماء تساوي $1\ gram = 10^{-3}\ kg$] كم جالونًا من الماء تساوي هذه الكمية؟

45. أمسك قلم رصاص أمام عينيك، ثمّ اجعله في موقع ما بحيث إن طرف الثلم يحجب القمر فقط (الشكل 1-16). اعمل القياسات المناسبة لتقدير قطر القمر، مع العلم أن المسافة بين الأرض والقمر تساوي $3.8 \times 10^5\ km$.



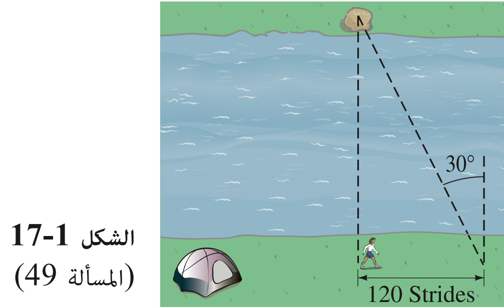
الشكل 1-16 (المسألة 45).
كم حجم القمر؟

46. قدر عدد الأيام التي تحتاج إليها كي تمشي حول العالم. افترض أنك تمشي في اليوم 10 h وبسرعة 4 km/h.

47. كانت أبعاد السفينة التي بناها سيدنا نوح عليه السلام كما يأتي: طولها 300 ذراع، وعرضها 50 ذراعًا، وارتفاعها 30 ذراعًا؛ حيث كان الذراع يستخدم كوحدة قياس تساوي طول ساعد الإنسان؛ أي من الكوع وحتى رأس أطول إصبع في اليد. عبّر عن أبعاد السفينة بالأمتار، ثم قدّر حجمها. بوحدة m^3.

48. سكب لتر من الزيت في بحيرة راكدة. فإذا انتشر الزيت على نحو منتظم حتى كوّن بقعة زيت سماكتها جزيء واحد والجزيئات المتجاورة فيها تلامس بعضها فقط. قدّر قطر بقعة الزيت. افترض أن قطر جزيء الزيت يساوي $2 \times 10^{-10}\ m$.

49. تخيم جين بجانب نهر عريض وتساءلت: كم يبلغ عرضه؟ حددت عموديًا صخرة كبيرة تقابلها مباشرة على الضفة الأخرى للنهر. ثم مشت عكس جريان الماء وقدرت أن الزاوية بينها وبين الصخرة التي ما زالت تراها بوضوح تساوي $30°$ باتجاه جريان الماء. (الشكل 1-17). كذلك قدرت جين أن طول خطوتها الواسعة تقريبًا ياردة واحدة، وأن المسافة التي تقطعها حتى تعود إلى المخيّم تساوي 120 خطوة. كم مترًا عرض النهر؟ وكم عرضه بالياردة؟



الشكل 1-17
(المسألة 49)

50. يدعي صانع ساعات أن الساعة التي يصنعها لا تقدم أو تؤخر أكثر من 8 ثوانٍ في السنة. كم دقة هذه الساعة؟ عبر عن ذلك بالنسبة المئوية.

51. يبلغ قطر القمر 3480 km، ما حجمه؟ وكم قمرًا مثله تحتاج حتى يساوي حجمها حجم الأرض؟

52. الإنجستروم (ويرمز إليه Å) وحدة طول تساوي $10^{-10}\ m$، وهي رتبة المقدار نفسها التي للذرة. (أ) كم نانو مترًا يوجد في 1.0 إنجستروم؟ (ب) كم فيمتو مترا أو فيرميًا (وحدة طول شائعة الاستعمال في الفيزياء النووية) يوجد في 1.0 إنجستروم؟ كم إنجسترومًا يوجد في السنة الضوئية (انظر المسألة 22)؟

53. حدد النسبة المئوية في عدم اليقين للزاوية θ و جا θ وذلك عندما:

(أ) $\theta = 15.0° \pm 0.5°$

(ب) $\theta = 75.0° \pm 0.5°$

54. إذا بدأت بالمشي على طول أحد خطوط الطول للأرض، ثم مشيت حتى غيرت خط العرض بدقيقة واحدة من طول القوس (هناك 60 دقيقة في كل درجة)، فكم ميلاً سرت؟ تسمى هذه المسافة الميلَ البحري.

إجابات التمارين

(أ): د

(ب): لا: 3 ، 2

(جـ): كل عدد من الأعداد يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية بالرغم من أن عدد المنازل العشرية أ- 2 ب- 3 جـ 4

(د): 28,251ft, 29,035ft، 28,169 ft على الترتيب.

(هـ): لا: $15\ m/s \approx 34\ mi/h$

أطلقت سيارة ذات سرعة عالية مظلّة كي تقلل من سرعتها على نحو سريع. يبين السهم الأخضر اتجاه سرعة السيارة، أما السهم الذهبي فيشير إلى اتجاه تسارعها. يتم وصف الحركة باستعمال مفاهيم السرعة والتسارع. أحيانًا قد يكون التسارع معاكسًا $(\vec{a})$ لاتجاه السرعة $(\vec{v})$ كما هو مبين في الصورة. وسندرس أيضًا بالتفصيل الحركة بتسارع ثابت، وكذلك الحركة العمودية للأجسام التي تسقط تحت تأثير الجاذبية.



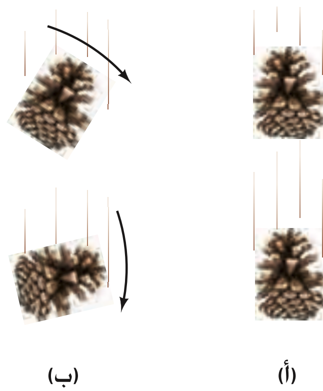
الفصل 2

وصف الحركة: علم الحركة (الكينماتيكا) في بعد واحد

إن حركةَ الأجسام - مثل كرة القدم والسيارة وحتى الشمس والقمر - هي جزءٌ واضح من حياتنا اليومية، ولم يتضح المفهوم الحديث للحركة إلا في القرنين السادس عشر والسابع عشر. ولقد ساهم أشخاص عديدون، مثل: غاليليو غالي (1564-1642)، وإسحق نيوتن (1642-1727) في صياغة المفهوم الحديث للحركة.

تشكل دراسة حركة الأجسام والمفاهيم المتعلقة بالقوة والطاقة مجالًا يسمى **علم الميكانيكا** الذي يقسم عادة إلى قسمين هما: 1 - علم الحركة (**الكينماتيكا**) الذي يصف كيفية تحرّك الأجسام. 2 - علم التحرّك (**الديناميكا**) الذي يتناول القوة، وسبب تحرك الأجسام تحت تأثيرها. وستقتصر دراستنا في هذا الفصل والذي يليه على علم الحركة.

نناقش الآن فقط الأجسام التي تتحرك من غير دوران (الشكل 2 - 1أ). وتسمى هذه الحركة **بالحركة الانتقالية**. ترتبط دراستنا لهذا الفصل بوصف جسم يتحرك في خط مستقيم؛ أي الحركة الانتقالية في بعد واحد، وفي الفصل الثالث، نَصِفُ الانتقالية في بعدين أو ثلاثة أبعاد في مسارات غير مستقيمة (وأما الحركة الدورانية كما في (الشكل 2 - 1ب) فسنناقشها في الفصل الثامن). في كثير من الأحيان، سنستعمل مفهوم (**أو نموذج**) سقوط الجسيم المثالي الذي يمثل نقطة رياضية ليس لها بعد مكاني (ليس لها حجم). يمكن للجسيم القيام بالحركة الانتقالية فقط، إن نموذج الجسيم مفيد للغاية في حالات حقيقية عديدة نهتم فيها بالحركةالانتقالية فقط، وذلك عندما يكون حجم الجسم غير مهم، فعلى سبيل المثال: يمكن اعتبار كرة البليارد أو حتى مركبة الفضاء التي تسافر نحو القمر جسيمًا للعديد من الأهداف.

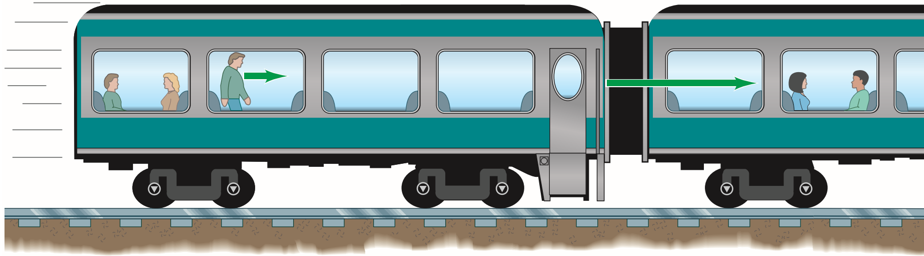


الشكل 2-1 إن مخروط الصنوبر في (أ) يخضع للحركة الانتقالية عند سقوطه، أما في (ب) فإنه يخضع للحركتين الانتقالية والدورانية.

1-2 أطر الإسناد والإزاحة

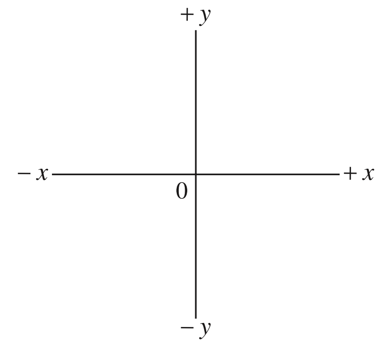
تتم جميع القياسات بالنسبة لإطار مرجعي

إن أي قياس للموضع أو المسافة أو السرعة يجب أن يتم بالنسبة إلى **إطار مرجعي (إسناد)** معين. فعلى سبيل المثال: في أثناء ركوبك في قطار يسير بسرعة 80 km/h، افترض أن أحد الأشخاص يمشي نحو مقدمة القطار بسرعة 5 km/h كما في (الشكل 2-2). إن هذه السرعة (5 km/h) هي سرعة الشخص بالنسبة إلى القطار كونها إطارًا إسناديًّا. أما بالنسبة إلى الأرض، فإنّ ذلك الشخص يتحرك بسرعة 80 km/h + 5 km/h = 85 km/h، ومن ثَمَّ فإنه من الضروري دائمًا تحديد إطار الإسناد عند الحديث عن السرعة، وفي حياتنا اليومية، فإننا عادة ما نقصد أن القياس يتم بالنسبة إلى الأرض من غير حتى التفكير في ذلك، وعلى أي حال، يجب تحديد إطار الإسناد حتى لا يحدث التباس في الموضوع.



الشكل 2-2 يمشي أحد الأشخاص نحو مقدمة القطار بسرعة 5 km/h. ويسير القطار بسرعة 80 km/h بالنسبة إلى الأرض، ولذلك فإن سرعة هذا الشخص بالنسبة إلى الأرض تساوي 85 km/h.

عند وصف حركة جسم ما، فمن الضروري تحديد اتجاه حركته وليس تحديد سرعته فقط. وفي أغلب الأحيان نحدد الاتجاه باستعمال كلمات، مثل: شمال، جنوب، شرق، غرب، إلى الأعلى، أو إلى الأسفل. أما في دراسة الفيزياء، فيجب أن نرسم مجموعة من **محاور الإحداثيات**، كما في (الشكل 2-3) لتمثل إطار الإسناد. ففي هذا الشكل، تمثل (0) نقطة الأصل، أما المحوران x و y اللذان يكونان دائمًا متعامدين فيمثلان الاتجاهين. وبناءً على ذلك، فإن الأجسام الموجودة على المحور x وإلى يمين نقطة الأصل يكون إحداثيها موجبًا. أما الأجسام التي إلى يسار نقطة الأصل فيكون إحداثيها x سالباً. في حين يكون الموضع الذي على طول المحور y موجبًا أعلى نقطة الأصل وسالبًا إذا كان أسفلها، كما يمكن استخدام العكس إذا كان ذلك مناسبًا. إن أي نقطة في هذا المستوى تحدد بالإحداثيين y و x. أما في حالة الأبعاد الثلاثة، فيضاف المحور z على نحو عمودي على كل من y و x.



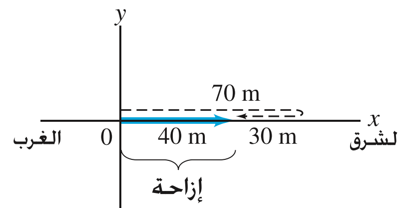
الشكل 2-3 محاور الإحداثيين xy.

لدراسة الحركة في بعد واحد: نختار المحور x ليمثل الخط الذي تحدث عليه الحركة، ومن ثَمَّ فإن موضع الجسم في أي لحظة يحدد بالإحداثي x. أما إذا كانت الحركة عمودية، كما هو الحال بالنسبة إلى الأجسام التي تسقط نحو الأسفل، فإننا نستعمل عادة المحور y.

الإزاحة

تختلف المسافة التي يقطعها جسم ما عن إزاحته، التي تعرّف على أنها التغير في موضع الجسم. أي إن **الإزاحة** تمثل بعد الجسم عن النقطة التي بدأ منها حركته. ولمعرفة الفرق بين المسافة الكلية والإزاحة تخيل أن شخصاً ما يمشي 70 m نحو الشرق ثم يستدير إلى الخلف، ومن ثمّ يمشي نحو الغرب مسافة 30 m كما في (الشكل 2 - 4). إن المسافة الكلية التي قطعها هذا الشخص تساوي 100 m ولكن إزاحته تساوي 40 m لأنه أصبح الآن على بعد 40 m من نقطة البداية.

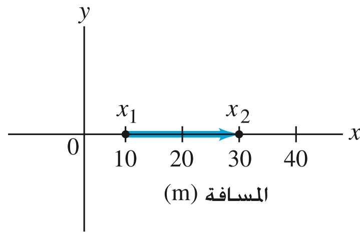
تنويه:
قد لا تكون الإزاحة مساوية للمسافة الكلية التي يقطعها الجسم.



الشكل 2 - 4 يمشي شخص ما 70 m نحو الشرق، ثم 30 m نحو الغرب. إن المسافة الكلية التي قطعها هذا الشخص تساوي 100 m (المسار المبين بالخط الأسود المقطع) ولكن إزاحته تساوي 40 m نحو الشرق، كما هو مبين بالسهم الأزرق.

الإزاحة كمية تحدد بالمقدار والاتجاه معًا. وتسمى مثل هذه الكميات بالمتجهات، وتمثل بأسهم في المخططات البيانية. فعلى سبيل المثال، في (الشكل 2 - 4) يمثل السهم الأزرق الإزاحة التي مقدارها 40 m واتجاهها نحو اليمين (الشرق).

وسوف نتعامل مع المتجهات بتفصيل أكثر في الفصل الثالث. أما في هذا الفصل، فسندرس الحركة في بعد واحد على خط مستقيم. وفي هذه الحالة، فإن المتجهات التي تشير إلى اتجاه واحد تكون موجبة، وأما المتجهات التي تشير إلى الاتجاه المعاكس فتكون سالبة؛ أي توضع إشارة السالب بجانب مقدارها.



الشكل 2-5 يمثل السهم الإزاحة $x_2 - x_1$. المسافات بالأمتار.

دعنا ندرس الآن حركة جسم ما خلال مدّة زمنية معينة. افترض أن موضع الجسم على المحور x عند الزمن t_1 هو x_1 كما في النظام الإحداثي المبين في (الشكل 2-5)، وافترض أيضًا أن الجسم تحرك على هذا المحور بحيث أصبح موضعه عند الزمن t_2 هو x_2. إن إزاحة هذا الجسم تساوي $x_2 - x_1$ وتمثل في المتّجه الذي يشير نحو اليمين في (الشكل 2-5)، وتكتب هكذا:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

حيث يعني الرمز Δ (حرف لاتيني يقرأ دلتا) (التغير في). وعليه فإن Δx تعني التغير في x أو التغير في الموضع الذي يساوي الإزاحة. لاحظ أن التغير في أي كمية يعني القيمة النهائية ناقص القيمة الابتدائية.

Δ تعني القيمة النهائية ناقص القيمة الابتدائية.

افترض أن $x_1 = 10.0$ m و $x_2 = 30.0$ m لذا فإن:

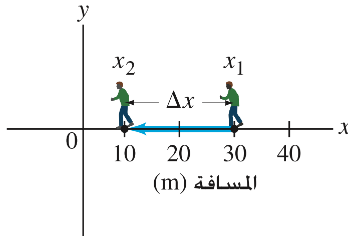
$$\Delta x = x_2 - x_1 = 30.0\,\text{m} - 10.0\,\text{m} = 20.0\,\text{m}$$

ولهذا، فإن الإزاحة تساوي 20.0 m بالاتجاه الموجب، كما في (الشكل 2-5).

افترض الآن أن جسماً ما قد تحرك نحو اليسار، كما في (الشكل 2-6). في هذه الحالة، نلاحظ أن الجسم قد بدأ حركته من الموضع $x^1 = 30.0$ m ومشى نحو اليسار إلى النقطة $x_2 = 10.0$ m، إذن:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 10.0\,\text{m} - 30.0\,\text{m} = -20.0\,\text{m}$$

الشكل 2-6 يشير متجه الإزاحة $\Delta x = x_2 - x_1 = 10.0\,\text{m} - 30.0\,\text{m}$ نحو اليسار.



والسهم الأزرق الذي يمثل الإزاحة يشير نحو اليسار؛ أي أن الإزاحة تساوي 20.0 m نحو الاتجاه السالب. يوضح هذا المثال أنه عند دراسة الحركة في بعد واحد على المحور x يكون المتجه الذي يشير نحو اليمين موجباً، والمتجه الذي يشير نحو اليسار سالباً.

2-2 متوسط السرعة

لنتناول حركة كل من: عدّاء في سباق، حصان يركض، سيارة مسرعة أو حتى صاروخ ينطلق إلى الفضاء؛ إن الصفة المشتركة لحركة هذه الأجسام هي السرعة التي تتحرك بها، والتي تقودنا إلى مفهومي السرعة والسرعة المتجهة. يشير مصطلح السرعة إلى المسافة التي يقطعها جسم ما خلال مدّة زمنية بغض النظر عن الاتجاه، فإذا قطعت سيارة مسافة 240 km في 3 h فإن متوسط السرعة يساوي 80 km/h. وعلى نحو عام، يعرّف متوسط السرعة على أنه المسافة الكلية التي يقطعها الجسم على مسار ما مقسومة على الزمن الذي استغرقه لقطع هذه المسافة. أي أن:

متوسط السرعة

$$\text{متوسط السرعة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن المستغرق}} \qquad \textbf{(1-2)}$$

وفي أغلب الأحيان تستعمل السرعة والسرعة المتجهة في حياتنا اليومية خطأ على أنهما الكمية نفسها. ولكن في الفيزياء يجب أن نفرق بين هذين المصطلحين. إن **السرعة عبارة** عن عدد موجب تتبعه وحدة قياس. أما **السرعة المتجهة** فإنها تستعمل للإشارة إلى مقدار (قيمة عددية) السرعة التي يتحرك بها الجسم، وكذلك إلى اتجاه حركته (لذلك فإن السرعة المتجهة هي كمية متجهة). وهناك فرق آخر بين السرعة والسرعة المتجهة، وهو متوسط السرعة المتجهة، الذي يعرف بدلالة الإزاحة بدلًا من المسافة المقطوعة؛ أي أن:

السرعة

متوسط السرعة

$$\text{متوسط السرعة} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\text{الموضع النهائي - الموضع الابتدائي}}{\text{الزمن المستغرق}}$$

تنويه !

ليس من الضروري أن يكون متوسط السرعة مساوياً لمقدار متوسط السرعة المتجهة.

إن متوسط السرعة ومتوسط السرعة المتجهة لهما المقدار نفسه عندما تكون الحركة كلها في بعد واحد. وفي حالات أخرى، قد يختلف مقدار كل منهما عن الآخر. وبالعودة إلى (الشكل 2-4) نجد أن الشخص قد قطع مسافة 70 m شرقاً ثم 30 m غرباً. وعليه، فإن المسافة الكلية التي قطعها هذا الشخص تساوي $70\text{ m} + 30\text{ m} = 100\text{ m}$، ولكن إزاحته 40 m. فإذا افترضنا أن الزمن الذي استغرقه هذا الشخص في المشي 70 s فإن متوسط سرعته يساوي:

$$\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{100\text{ m}}{70\text{ s}} = 1.4\text{ m/s}$$

أما مقدار متوسط السرعة المتجهة فيساوي:

$$\frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{40\text{ m}}{70\text{ s}} = 0.57\text{ m/s}$$

يحدث هذا الفرق بين السرعة والسرعة المتجهة عندما نحسب القيمة المتوسطة لكل منهما.

متوسط السرعة المتجهة

وعلى نحو عام، لدراسة حركة جسم ما في بعد واحد، نفترض أن موضع الجسم على المحور x عند اللحظة t_1 هو x_1، وفي وقت لاحق t_2 أصبح موضعه x_2. إن الزمن المستغرق $t_2 - t_1$ يمثل المدّة الزمنية التي تصبح خلالها إزاحة الجسم $\Delta x = x_2 - x_1$؛ لذلك فإن متوسط السرعة المتجهة الذي يعرف على أنه الإزاحة مقسومة على الزمن المستغرق، يكتب هكذا:

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad \textbf{(2-2)}$$

حيث يشير الرمز $\bar{v}$ إلى متوسط السرعة المتجهة، أما المدّة الزمنية $t_2 - t_1$ فتمثل الزمن الذي استغرقه الجسم في الحركة خلال المدّة التي اخترناها لمراقبته.

حل المسألة

تبين الإشارتان + أو - اتجاه الحركة الخطية

وفي حال اعتبرنا محور x الموجب نحو اليمين، وكانت x_2 أقل من x_1، فإن الجسم يتحرك نحو اليسار. وفي هذه الحالة، فإن الإزاحة $\Delta x = x_2 - x_1$ تكون سالبة. وهكذا فإن إشارة الإزاحة، ومن ثَمَّ إشارة متوسط السرعة المتجهة تشير إلى الاتجاه؛ يكون متوسط السرعة المتجهة موجبًا للجسم الذي يتحرك نحو اليمين على طول المحور $+x$ وسالبًا إذا تحرك نحو اليسار، ويكون اتجاه متوسط السرعة المتجهة دائمًا باتجاه الإزاحة.

المثال 2-1 متوسط السرعة المتجهة لعدّاء.

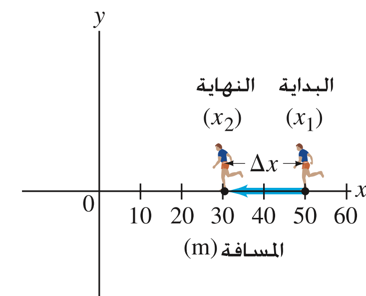
عندما يتحرك عدّاء على المحور x للنظام الإحداثي، فإن موضعه يمثل بدلالة الزمن. فإذا تغير موضع العداء من $x_1 = 50.0\text{ m}$ إلى $x_2 = 30.5\text{ m}$ خلال مدّة زمنية مقدارها 3.00-s، كما في (الشكل 2-7)، فكم كان متوسط السرعة المتجهة للعدّاء؟

النهج: نريد إيجاد متوسط السرعة المتجهة الذي يمثل الإزاحة مقسومة على المدّة الزمنية.

الحل: إن الإزاحة تساوي $\Delta x = x_2 - x_1 = 30.5\text{ m} - 50.0\text{ m} = -19.5\text{ m}$ أما المدّة الزمنية $\Delta t = 3.00\text{ s}$، ومن ثَمَّ فإن متوسط السرعة المتجهة هو:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-19.5\text{ m}}{3.00\text{ s}} = -6.50\text{ m/s}$$

نلاحظ هنا أن الإزاحة ومتوسط السرعة المتجهة سالبان، وهذا يدل على أن العداء يتحرك على المحور x نحو اليسار، كما يوضح السهم الذي في (الشكل 2 - 7).



الشكل 2-7 المثال 2-1 يركض شخص من الموضع $x_1 = 50.0\text{ m}$ إلى $x_2 = 30.5\text{ m}$ فتكون إزاحته -19.5 m.

المثال 2-2 المسافة التي يقطعها راكب دراجة.

كم المسافة التي يقطعها راكب دراجة خلال 2.5h عندما يسير على طريق مستقيم بمتوسط سرعة متجهة مقداره 18 km/h؟

النهج: الكميات المعلومة لدينا هي متوسط السرعة المتجهة والمدّة الزمنية (2.5h=)، والمطلوب إيجاد المسافة المقطوعة؛ لذلك نحل المعادلة 2-2 بدلالة Δx.

الحل: أعد كتابة المعادلة 2-2 كما يأتي:

$$\Delta x = \bar{v}\,\Delta t$$

وهكذا نجد أن:

$$\Delta x = \bar{v}\,\Delta t = (18\text{ km/h})(2.5\text{ h}) = 45\text{ km}$$

3-2 السرعة المتجهة اللحظية

إذا قدت سيارتك على طريق مستقيم في اتجاه واحد وقطعت 150 km في ساعتين، فإن مقدار متوسط السرعة المتجهة يساوي 75 km/h. ومع ذلك، فمن غير المرجح أن تكون سرعة السيارة عند كل لحظة 75 km/h بالضبط. وفي مثل هذه الحالة، نحتاج إلى مفهوم السرعة المتجهة اللحظية، وهي السرعة عند لحظة ما (مقدارها هو العدد، مع وحدة القياس، كما يشير إليه مقياس السرعة المبين في الشكل 2 - 8). وبدقة أكثر، تعرف السرعة المتجهة اللحظية عند لحظة ما على أنها متوسط السرعة المتجهة خلال مدّة زمنية متناهية في الصغر، أي أننا نبدأ من المعادلة 2-2.

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

ونعرف السرعة المتجهة اللحظية على أنها متوسط السرعة المتجهة عندما تكون المدّة الزمنية صغيرة جداً؛ أي تقترب من الصفر، ويمكن كتابة تعريف السرعة المتجهة اللحظية v في بعد واحد كما يأتي:

السرعة المتجهة اللحظية

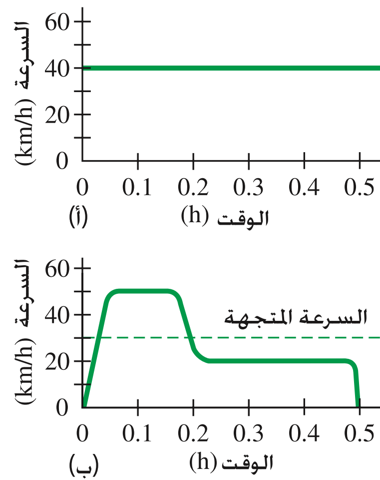
$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad \text{(2-3)}$$

حيث يشير الرمز $\lim_{\Delta t \to 0}$ إلى أنه يتم إيجاد النسبة $\Delta x/\Delta t$ عندما تقترب Δt من الصفر. ويستخدم الرمز $\bar{v}$ للتعبير عن السرعة المتجهة اللحظية، أما الرمز $\bar{v}$ فيشير إلى متوسط السرعة المتجهة. في الجزء المتبقي من هذا الكتاب، عندما نستعمل مصطلح السرعة المتجهة فإن ذلك يشير إلى السرعة المتجهة اللحظية، وعندما نتحدث عن متوسط السرعة المتجهة فإننا نوضح ذلك باستعمال كلمة متوسط. لاحظ أن السرعة اللحظية تساوي دائمًا مقدار السرعة المتجهة اللحظية، لماذا؟ لأن المسافة تصبح مساوية لمقدار الإزاحة عندما يكون كل منهما متناهياً في الصغر.

عندما يتحرك جسم ما بسرعة متجهة منتظمة (أي ثابتة) خلال مدّة زمنية معينة، فإن سرعته المتجهة اللحظية عند أي لحظة هي متوسط سرعته المتجهة نفسها (انظر الشكل 2-9 أ). وفي أغلب الحالات لا يكون ذلك صحيحاً. فعلى سبيل المثال، قد تبدأ سيارة حركتها من السكون وتزداد سرعتها حتى تصل 50 km/h وتسير بهذه السرعة مدّة زمنية، ثم تقل سرعتها إلى 20 km/h في ازدحام مروري، وأخيرًا تقف بعد أن تكون قد قطعت ما مجموعه 15 km في 30 min. تُمَثَّل هذه الرحلة بيانيًا كما في (الشكل 2-9 ب). يظهر على الرسم أيضًا متوسط السرعة المتجهة (الخط المتقطع)، الذي يساوي $\bar{v} = \Delta x/\Delta t = 15\,\text{km}/0.50\,\text{h} = 30\,\text{km/h}$



الشكل 2 - 8 يبين مقياس السرعة في السيارة وحدة القياس mi/h باللون الأبيض ووحدة القياس km/h باللون البرتقالي.



الشكل 2 - 9 سرعة سيارة بدلالة الزمن عندما تكون السرعة: (أ) ثابتة (ب) متغيرة.

4-2 التسارع

يقال للجسم الذي يتحرك وتتغير سرعته المتجهة بأنه يتسارع، فعلى سبيل المثال: إنّ أيّ سيارة تزداد سرعتها من صفر إلى 80 km/h نقول بأنها تتسارع، أي أن التسارع يحدد السرعة التي تتغير بها السرعة المتجهة لجسم ما. ويعرف متوسط التسارع على أنه التغير في السرعة المتجهة مقسومة على الزمن الذي حدث فيه هذا التغير.

$$\text{متوسط التسارع} = \frac{\text{التغير في السرعة المتجهة}}{\text{المدّة الزمنية}}$$

وبالرموز، فإن متوسط التسارع $\bar{a}$ خلال المدّة الزمنية $\Delta t = t_2 - t_1$ التي حدث فيها التغير في السرعة المتجهة $\Delta v = v_2 - v_1$ يعرف على أنه

متوسط التسارع

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(4-2)}$$

ومع أن التسارع كمية متجهة، إلا أننا وخلال دراستنا للحركة في بعد واحد نحتاج فقط إلى استعمال إشارة موجب أو إشارة سالب للإشارة إلى الاتجاه بالنسبة إلى النظام الإحداثي الذي تم اختياره.

ويعرف التسارع اللحظي عند أي لحظة بالطريقة نفسها التي عرفت بها السرعة المتجهة اللحظية؛ أي أن:

التسارع اللحظي

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \textbf{(5-2)}$$

وتشير Δv هنا إلى تغير صغير جداً في السرعة المتجهة خلال مدّة زمنية Δt صغيرة جداً أيضًا.

المثال 2-3 **متوسط التسارع.**

تتسارع سيارة من السكون على طريق مستقيم (كما في الشكل 2-10) حتى تصبح سرعتها 75 km/h في 5.0 s. ما مقدار متوسط تسارعها؟

السكون يعني أن $v = 0$.

النهج: متوسط التسارع هو التغير في السرعة المتجهة مقسومًا على المدّة الزمنية 5.0 s. بما أن السيارة بدأت من السكون، فإن $v_1 = 0$، ولهذا فإن السرعة المتجهة النهائية $v_2 = 75\ \text{km/h}$.

الحــل: من المعادلة 2-4 متوسط التسارع يساوي

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{75\ \text{km/h} - 0\ \text{km/h}}{5.0\ \text{s}} = 15\ \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$$

ويقرأ هذا «خمسة عشر كيلو متراً لكل ساعة لكل ثانية»، ويعني ذلك أن السرعة تتغير في المتوسط بـ 15 km/h خلال كل ثانية. أي: افترض أن التسارع كان ثابتًا، إذن فسرعة السيارة ستزداد خلال الثانية الأولى من صفر إلى 15 km/h. وخلال الثانية التالية تزداد سرعتها أيضا 15 km/h لتصل سرعتها إلى 30 km/h في ثانيتين، وهكذا. انظر إلى (الشكل 2-10).

ملحوظة: تحتوي النتيجة التي حصلنا عليها على وحدتي قياس للزمن هما: ساعة وثانية. ولكننا نفضل عادة استعمال الثانية كوحدة قياس للزمن. ولذلك نحوّل km/h إلى m/s (انظر إلى البند 1-6 والمثال 1-5):

$$75\ \text{km/h} = \left(75\ \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)\left(\frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}}\right)\left(\frac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}}\right) = 21\ \text{m/s}$$

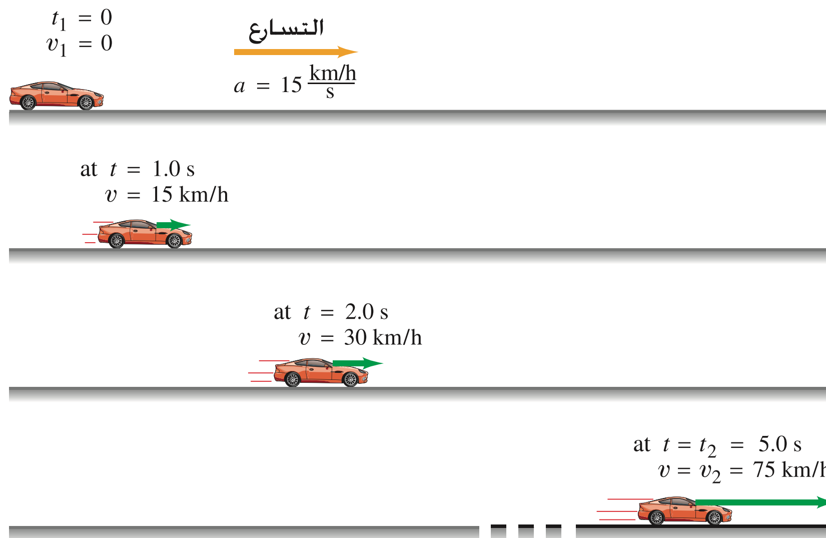
ثم نجد أن متوسط التسارع يساوي

$$\bar{a} = \frac{21\ \text{m/s} - 0.0\ \text{m/s}}{5.0\ \text{s}} = 4.2\ \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 4.2\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

وغالبًا ما نكتب وحدة قياس التسارع هكذا m/s^2 (وتُقرأ مترًا لكل ثانية تربيع) بدلاً من m/s/s لأن:

$$\frac{\text{m/s}}{\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}\cdot\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

وبناء على الحسابات التي في (المثال 2-3)، فإن السرعة المتجهة تتغير في المتوسط بـ 4.2 m/s في الثانية الواحدة؛ ليكون التغير الكلي في السرعة المتجهة 21 m/s خلال 5.0 s.



الشكل 2-10 (المثال 2-3).

يبين الشكل السيارة عند بداية الحركة؛ حيث $v_1 = 0$ عند اللحظة $t_1 = 0$. كما يبين الشكل أيضًا السيارة عندما $t = 1.0\ \text{s}$ ، و عندما $t = 2.0\ \text{s}$، وعند نهاية المدّة الزمنية $t_2 = 5.0\ \text{s}$. وقد افترضنا أن التسارع ثابت ويساوي 15 km/h/s. تمثل الأسهم ذات اللون الأخضر متجهات السرعة؛ حيث يمثل طول كل سهم مقدار السرعة المتجهة عند تلك اللحظة، أما متجه التسارع فيمثل بالسهم البرتقالي. لاحظ أن الشكل لا يتضمن المسافات التي قطعتها السيارة.

لاحظ أن التسارع يخبرنا كيف أن السرعة المتجهة تتغير على نحو سريع، في حين تخبرنا السرعة المتجهة أن الموضع يتغير على نحو سريع.

تنويه !
ميز السرعة المتجهة عن التسارع.

المثال المفاهيمي 2-4: السرعة المتجهة والتسارع.

(أ) إذا كانت سرعة جسم ما صفرًا، فهل هذا يعني أن تسارعه صفر؟ (ب) إذا كان التسارع صفرًا، فهل هذا يعني أن السرعة صفر؟ فكر في بعض الأمثلة.

الحل: عندما تكون السرعة المتجهة صفرًا، فهذا لا يعني بالضرورة أن يكون التسارع صفرًا، وكذلك إذا كان التسارع صفراً فإنه لا يعني أن السرعة المتجهة صفر. (أ) على سبيل المثال، عندما تضع قدمك على دواسة البنزين في سيارتك التي تكون ساكنة، فإن السرعة تبدأ من الصفر، ولكن التسارع ليس صفراً؛ لأن سرعة السيارة تتغير (كيف يمكن إذن لسيارتك أن تتحرك إلى الأمام إذا لم تتغير السرعة المتجهة؛ هذا هو التسارع.) (ب) عندما تقود سيارتك على طريق سريع بسرعة متجهة ثابتة مقدارها $100\ \text{km/h}$ فإن التسارع يكون صفرًا، ولكن السرعة المتجهة لا تساوي صفرًا. $a = 0, v \neq 0$

تنويه !
إذا كانت a أو v يساوي صفر، فهل هذا يعني أن الآخر صفرًا أيضًا؟.

التمرين(أ): أُعلن أن سيارة تنطلق من الصفر لتصل سرعتها المتجهة إلى $60\ \text{mi/h}$ في $6.0\ \text{s}$. بماذا يخبرنا ذلك عن السيارة : (أ) سريعة (سرعة عالية) أم (ب) تتسارع؟

المثال 2-5 تباطؤ السيارة.

تتحرك سيارة إلى اليمين على طريق سريع ومستقيم، والذي اخترناه ليمثل محور x الموجب (الشكل 2 - 11) . ثم استعمل السائق الكابح. فإذا كانت السرعة المتجهة الابتدائية (عندما استعمل السائق الكابح) $v_1 = 15.0\ \text{m/s}$، ثم انخفضت سرعتها لتصل $v_2 = 5.0\ \text{m/s}$ خلال $5.0\ \text{s}$، فكم كان متوسط تسارع السيارة؟

النهج: معلوم لدينا السرعة المتجهة الابتدائية والنهائية، وكذلك الزمن المستغرق، وعليه يمكن استعمال (المعادلة 2-4) لحساب متوسط التسارع .

الإجابة: نستعمل (المعادلة 2-4) ونتذكر أن الزمن الابتدائي $t_1 = 0$ و $t_2 = 5.0\ \text{s}$. (لاحظ أن اختيار الزمن الابتدائي $t_1 = 0$ لا يؤثر في حساب متوسط التسارع لأن $\Delta t = t_2 - t_1$ هي التي تظهر فقط في (المعادلة 2-4). وهكذا فإن:

$$\bar{a} = \frac{5.0\ \text{m/s} - 15.0\ \text{m/s}}{5.0\ \text{s}} = -2.0\ \text{m/s}^2$$

تظهر إشارة السالب في الحل النهائي؛ لأن السرعة المتجهة النهائية أقل من السرعة المتجهة الابتدائية. وفي هذه الحالة، يكون اتجاه التسارع إلى اليسار (باتجاه محور x السالب) بالرغم من أن اتجاه السرعة المتجهة نحو اليمين. ولذلك نقول إن التسارع يساوي $2.0\ \text{m/s}^2$ نحو اليسار، ويمثل في (الشكل 2 - 11) بالسهم البرتقالي.

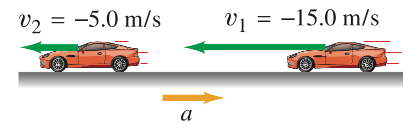
التسارع
at $t_1 = 0$
$v_1 = 15.0\ \text{m/s}$ $a = -2.0\ \text{m/s}^2$
at $t_2 = 5.0\ \text{s}$
$v_2 = 5.0\ \text{m/s}$

الشكل 2-11 (المثال 2 - 5) يبين الشكل موضع السيارة عند اللحظتين t_1 , t_2 ويمثل السهم الأخضر السرعة المتجهة للسيارة. متجه التسارع (اللون البرتقالي) يشير إلى اليسار؛ لأن السيارة تتباطأ في أثناء حركتها إلى اليمين.

التباطؤ

عندما تقل السرعة المتجهة لجسم ما نقول أحيانا بأنه يتباطأ. والتباطؤ لا يعني بالضرورة أن التسارع سالب. فالجسم الذي يتحرك إلى اليمين على محور x الموجب وتقل سرعته المتجهة يكون تسارعه سالباً (كما في الشكل 2-11). ولكن إذا تحركت السيارة نفسها إلى اليسار (x تتناقص) وقلت سرعتها، فإن تسارعها موجب ويشير إلى اليمين، كما في الشكل 2-12. ويقال بأن الجسم يتباطأ عندما يقل مقدار سرعته المتجهة، وفي هذه الحالة تكون السرعة المتجهة والتسارع في اتجاهين متعاكسين.

تنويه !
التباطؤ يعني أن مقدار السرعة المتجهة تتناقص. ولكن ليس من الضروري أن تكون a سالبة.



الشكل 2 - 12 السيارة التي في المثال 2-5 تتحرك الآن نحو اليسار وتتباطأ. والتسارع يساوي:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{-5.0\ \text{m/s} - (-15.0\ \text{m/s})}{5.0\ \text{s}} = \frac{-5.0\ \text{m/s} + 15.0\ \text{m/s}}{5.0\ \text{s}} = +2.0\ \text{m/s}$$

التمرين(ب): تتحرك سيارة على محور x. ما إشارة تسارع السيارة إذا تحركت على محور x الموجب مع: (أ) زيادة سرعتها؟ (ب) نقصان سرعتها ؟ وما إشارة التسارع إذا تحركت السيارة بالاتجاه السالب مع: (أ) زيادة سرعتها؟ (ب) نقصان سرعتها؟

5-2 الحركة بتسارع ثابت

افترض a = ثابتا

هناك العديد من الحالات العملية التي تحدث ويكون فيها التسارع ثابتاً أو ثابتًا تقريبًا. دعنا الآن نختبر هذه الحالة عندما يكون مقدار التسارع ثابتاً والحركة في خط مستقيم. في هذه الحالة يكون التسارع اللحظي مساوياً لمتوسط التسارع.

ولنعرف الآن كلًّا من السرعة المتجهة والتسارع لاشتقاق مجموعة معادلات مفيدة للغاية عندما يكون التسارع ثابتاً. تربط هذه المعادلات بين t ، و a ، و v، و x وتمكننا من معرفة أيّ من هذه المتغيرات إذا علمت بقيتها.

$x\ (\text{at}\ t = 0) = x_0$

$v\ (\text{at}\ t = 0) = v_0$

t = الوقت المستغرق

من أجل التبسيط في الرموز المستعملة؛ نفترض أن الزمن الابتدائي t_0: $t_1 = t_0 = 0$ (أي لحظة تشغيل ساعة التوقيت) والزمن الذي يستغرقه الجسم في حركته $t_2 = t$. أما الموضع الابتدائي (x_1) والسرعة المتجهة الابتدائية (v_1) فيرمز إليهما بـ x_0, v_0 وتمثل كل من x, v عند اللحظة $t = 0$. وأمّا بالنسبة للموضع والسرعة بعد مرور الزمن t فيرمز إليهما بـ x, v (بدلا من x_2, v_2) وهكذا فإن متوسط السرعة المتجهة خلال المدّة الزمنية $t - t_0$ يساوي:

$$\bar{v} = \frac{x - x_0}{t - t_0} = \frac{x - x_0}{t}$$

أما التسارع $t_0 = 0$ وعلى فرض أنه ثابت فيساوي (المعادلة 2 - 4):

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

ومن المسائل الشائعة تحديد السرعة المتجهة لجسم ما بعد مرور زمن معين t على بدء حركته، وذلك عندما يتحرك بتسارع ثابت ومعلوم. يمكن حل مثل هذه المسائل باستعمال المعادلة الأخيرة أعلاه لنحصل على

ترتبط v مع a و t

$$v = v_0 + at \quad [\text{تسارع ثابت}] \qquad \textbf{(6-2)}$$

فعلى سبيل المثال، قد يكون معلوماً لدينا أن تسارع درّاجة ما يساوي $4.0\ \text{m/s}^2$، ونريد تحديد سرعتها المتجهة بعد مرور $6.0\ \text{s}$ على بدء حركتها على فرض أنها بدأت حركتها من السكون ($v_0 = 0$ عندما $t_0 = 0$). عند اللحظة $t = 6.0\ \text{s}$ تكون سرعة الدراجة $v = at = (4.0\ \text{m/s}^2)(6.0\ \text{s}) = 24\ \text{m/s}$.

دعنا الآن نجد موضع جسم ما بعد مرور زمن معين t على بدء حركته، وعلى فرض أنه يتحرك بتسارع ثابت. إن تعريف متوسط السرعة (المعادلة 2-2) هو $\bar{v} = (x - x_0)/t$ الذي يمكن كتابته كما يلي:

$$x = x_0 + \bar{v}t \qquad \textbf{(7-2)}$$

بما أن السرعة تزداد بمعدل ثابت، فإن متوسط السرعة $\bar{v}$ يكون في المنتصف بين السرعة المتجهة الابتدائية والسرعة المتجهة النهائية؛ أي أن:

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} \quad [\text{تسارع ثابت}] \qquad \textbf{(8-2)}$$

تنويه !

متوسط السرعة المتجهة، ولكن فقط إذا كان a = ثابتا.

(لاحظ أن المعادلة 2-8 ليس من الضروري أن تكون صحيحة إذا لم يكن التسارع ثابتاً). يمكن استعمال المعادلتين الأخيرتين مع (المعادلة 2-8) لنحصل على الموضع:

$$x = x_0 + \bar{v}t = x_0 + \left(\frac{v_0 + v}{2}\right)t$$

$$= x_0 + \left(\frac{v_0 + v_0 + at}{2}\right)t$$

أو

ترتبط x مع a و t (التسارع ثابت)

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 \quad [\text{تسارع ثابت}] \qquad \textbf{(9-2)}$$

إن المعادلات الثلاث؛ 2-6، و 2-8 و 2-9 هي من ضمن أربع معادلات مفيدة لوصف الحركة بتسارع ثابت. سنشتق الآن المعادلة الرابعة التي تكون مفيدة في الحالات التي لا يكون فيها الزمن معلوماً. نبدأ من (المعادلة 2-7) ونعوضها في (المعادلة 2-8)

$$x = x_0 + \bar{v}t = x_0 + \left(\frac{v + v_0}{2}\right)t$$

ثم نحل (المعادلة 2-6) بالنسبة إلى الزمن t لنحصل على:

$$t = \frac{v - v_0}{a}$$

ونعوّضها في المعادلة الأخيرة لنجد أن:

$$x = x_0 + \left(\frac{v + v_0}{2}\right)\left(\frac{v - v_0}{a}\right) = x_0 + \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

والآن، نحل هذه المعادلة بالنسبة لِـ v^2 لنحصل على

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad [\text{تسارع ثابت}] \quad \textbf{(2-10)}$$

ترتبط v مع a و x (a = ثابتًا)

وهذه هي المعادلة المطلوبة.

وعليه، يكون لدينا الآن أربع معادلات تربط بين كلّ من الموضع والسرعة المتجهة، والتسارع والزمن، وذلك عندما يكون التسارع a ثابتاً. ولقد جمعنا هذه المعادلات هنا في مكان واحد ليسهل الرجوع إليها مستقبلا.

معادلات علم الحركة للتسارع الثابت (سوف نستعملها كثيراً)

$$v = v_0 + at \quad [a = \text{ثابتًا}] \quad \textbf{(2-11 أ)}$$

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 \quad [a = \text{ثابتًا}] \quad \textbf{(2-11 ب)}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad [a = \text{ثابتًا}] \quad \textbf{(2-11 ج)}$$

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2}. \quad [a = \text{ثابتًا}] \quad \textbf{(2-11 د)}$$

وهذه المعادلات المفيدة لا تكون صحيحة إلا إذا كان التسارع a ثابتًا. وفي العديد من الحالات يمكن أن نضع $x_0 = 0$ وهذا يبسط المعادلات أعلاه بعض الشيء. لاحظ أن x تمثل الموضع وليس المسافة، ذلك أن $x - x_0$ هي الإزاحة، في حين أن t تمثل الزمن.

تطبيق الفيزياء

تصميم مطار

المثال 2-6 **تصميم مدرج مطار.**

لنفترض أنك تصمّم مطارًا للطائرات الصغيرة. وهناك طائرة من نوع معين من المحتمل أن تستعمل مدرج المطار، ويجب أن تصل سرعتها على الأقل قبل الإقلاع إلى 27.8 m/s (100 km/h)، ويمكن أن تتسارع بمقدار 2.00 m/s^2. (أ) إذا كان طول المدرج 150 m، فهل يمكن لهذه الطائرة أن تصل إلى السرعة المطلوبة للإقلاع؟ (ب) إذا لم تتمكن، فما أقل طول مناسب للمدرج؟

النهج: إن تسارع الطائرة ثابت ويساوي ($a = 2.00 \text{ m/s}^2$)، ولذلك يمكننا استعمال معادلات الحركة بتسارع ثابت. معلوم لدينا من الفرع (أ) أن الطائرة يمكن أن تسير مسافة 150 m. وبما أن الطائرة بدأت حركتها من السكون، لذلك فإن $v_0 = 0$ ويمكن اعتبار $x_0 = 0$.

المطلوب إيجاد سرعة الطائرة وتحديد ما إذا كانت تصل إلى 27.8 m/s على الأقل أم لا. نريد إيجاد السرعة v عندما يكون معلومًا لدينا

المعلوم	المطلوب
$x_0 = 0$	v
$v_0 = 0$	
$x = 150 \text{ m}$	
$a = 2.00 \text{ m/s}^2$	

حل المسألة

المعادلات 2-11 تصلح فقط إذا كان التسارع ثابتًا، وهذا ما نفترضه في هذا المثال.

الحل: (أ) من المعادلات الأربع أعلاه، نجد أن (المعادلة 2-11جـ) تعطي السرعة v عندما تكون قيم x_0, x, a, v_0 معلومة:

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$
$$= 0 + 2(2.0 \text{ m/s}^2)(150 \text{ m}) = 600 \text{ m}^2/\text{s}^2$$
$$v = \sqrt{600 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 24.5 \text{ m/s}$$

وهذا يعني أن طول المدرج غير كاف.

(ب) الآن نريد إيجاد أقل طول للمدرج، $x - x_0$. بما أن $v = 27.8 \text{ m/s}$ و $a = 2.00 \text{ m/s}^2$، فإننا نستعمل (المعادلة 2-11جـ) مرة أخرى، ولكن بكتابتها كما يلي:

$$(x - x_0) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(27.8 \text{ m/s})^2 - 0}{2(2.0 \text{ m/s}^2)} = 193 \text{ m}$$

وهكذا، فإنّ مدرّجًا طوله 200-m يكون مناسباً أكثر لهذه الطائرة.

6-2 مسائل محلولة

قبل حلّ المزيد من الأمثلة، دعنا ننظر في كيفية حل مسألة ما. أولا من الضروري أن تعرف أن الفيزياء ليست مجرد معادلات تحفظ عن ظهر قلب (في الحقيقية بدلاً من حفظ المعادلات (2-11) من الأفضل أن تفهم كيف تشتقها من تعريف كل من السرعة والتسارع كما فعلنا ذلك سابقًا). إن البحث عن معادلة من المحتمل أن تفيدك في حل مسألة ما قد يقودك إلى نتيجة خطأ، وهذا بالتأكيد لن يساعدك على فهم الفيزياء. إن الطريقة الفضلى لحل المسألة هو اتباع الخطوات التالية، التي وضعت ضمن إطار خاص (ستجد خلال هذا الكتاب الكثير منها؛ وذلك لمساعدتك في حل المسائل):

طريقة حل المسائل

1. اقرأ المسألة، ثم أعد **قراءتها** كاملة وبحذر قبل محاولة حلها.

2. حدّد **الجسم** (أو الأجسام) التي سوف تدرسها وعلى أي مدّة زمنية. وفي أغلب الأحيان يمكنك اختيار الزمن الابتدائي $t = 0$.

3. ارسم **مخططًا بيانيًا** أو صورةً تمثل الحالة التي تدرسها، واختر محوري الإحداثيات عندما يكون ذلك ضروريًا. (يمكنك وضع نقطة الأصل والمحورين في المكان الذي تريده حتى تجري حساباتك بسهولة. وحدد كذلك الاتجاهين الموجب والسالب للمحورين. عادة نختار المحور x الذي لليمين ليكون موجبًا).

4. سجل الكميات المعلومة لديك أو المعطيات، وبعد ذلك حدد الكمية التي تريد معرفتها. تذكر أن تأخذ بالحسبان الكميات عند بداية المدّة الزمنية المختارة ونهايتها. قد تحتاج إلى تفسير اللغة بدلالة مصطلحات فيزيائية. فعلى سبيل المثال " بدأ من السكون" تعني $v_0 = 0$.

5. فكّر على أيٍّ من **مبادىء الفيزياء** تنطبق المسألة. استعمل حدسك وتجاربك الخاصة، ثم خطّط لطريقة الحل.

6. حدّد المعادلات (و / أو التعريفات) التي تربط بين الكميات التي تشتمل عليها المسألة. وقبل استعمالها تأكد من أنها مناسبة للمجال قيد الدراسة. ينطبق هذا أيضًا على المسألة التي تدرسها (مثلا المعادلات 2-11 صحيحة فقط عندما يكون التسارع ثابتاً). إذا وجدت أن هناك معادلة يمكن تطبيقها وتشتمل على كميات معلومة، ومجهول ترغب في إيجاده، **فحل** المعادلة بالنسبة للمجهول، في حالات كثيرة، قد يحتاج إلى عدة حسابات أو إلى مجموعة من المعادلات. ويفضل في أغلب الأحيان الحل جبريًا بالنسبة للمجهول قبل تعويض القيم الحسابية.

7. اجرِ الحساب اللازم إذا كانت المسألة عددية. واحتفظ دائماً بمنزلة إضافية أو منزلتين خلال الحسابات، ولكن قرّب الحل النهائي بحيث يحتوي على العدد الصحيح من الأرقام المعنوية (البند 4-1).

8. فكّر في النتيجة التي تحصل عليها: هل هي معقولة؟ وهل لها معنى طبقًا لحدسك وتجربتك؟ والاختبار الجيد هو عمل تقدير تقريبي مستعملاً قوى العدد عشرة، كما جرت مناقشته في (البند 7-1). يفضل عادة استعمال **التقدير التقريبي** في بداية المسألة العددية لأنه يساعدك في تركيز اهتمامك على إيجاد طريقة للحل.

9. تتبع وحدات القياس في أثناء الحل. إن إشارة المساواه تعني أن الوحدات التي على طرفيها متساوية، تماما كما هو الحال بالنسبة إلى الأعداد، وإذا لم تتوازن **الوحدات** فإنك دون شك قد ارتكبت خطأً ما. يمكن استخدام ذلك كاختبار للتأكد من طريقة حلك (ولكن هذا الاختبار يبين فقط أنك أخطأت ولا يخبرك بصحة الحل). استعمل دائمًا مجموعة متوافقة من الوحدات.

المثال 7-2 تسارع سيارة

احسب الزمن الذي تستغرقه سيارة لتجتاز تقاطعاً عرضه 30.0-m بعد أن تصبح إشارة المرور خضراء، على افتراض أن السيارة بدأت من السكون، وتحرَّكت بتسارع ثابت مقداره $2.00\ m/s^2$؟

النهج: نتبع الخطوات التي وضعت في الإطار الخاص بحل مسألة ما خطوة بخطوة.

الحل:

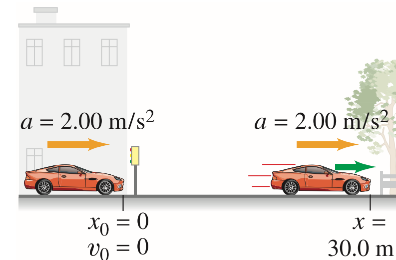
1. تأكد من أنك فهمتها وحددت المجهول الذي تطلبه المسألة (هنا المدّة الزمنية).

2. **الجسم موضع الدراسة هو السيارة.** نحتاج إلى تحديد المدّة الزمنية التي نراقب من خلالها حركة السيارة. نختار الزمن الابتدائي $t = 0$ ليمثل اللحظة التي بدأت عندما السيارة بالحركة من السكون $(v_0 = 0)$ والزمن t ليمثل اللحظة التي تكون عندها السيارة قد قطعت 30.0-m ؛ أي عرض التقاطع.

3. **ارسم مخططاً بيانياً يمثل هذه الحالة**، كما في (الشكل 2 - 13)، يتضح من الشكل أن السيارة تتحرك على محور x الموجب. نختار $x_0 = 0$ عند مقدمة السيارة قبل أن تبدأ حركتها.

حل المسألة

" البدء من السكون" يعني أن $v = 0$ عندما $t = 0$ (أي أن $v_0 = 0$)



الشكل 2-13 ، (المثال 2-7)

المعلوم	المجهول
$x_0 = 0$ $x = 30.0\ \text{m}$ $a = 2.00\ \text{m/s}^2$ $v_0 = 0$	t

4. الكميات **المعلومة** وتلك المطلوب إيجادها موضحة في الجدول الذي على الهامش؛ حيث اخترنا $x_0 = 0$. لاحظ أن "بدأ من السكون" تعني أن $v = 0$ عند اللحظة $t = 0$؛ أي أن $v_0 = 0$.

5. الفيزياء : حدثت الحركة بتسارع ثابت، لذلك يمكننا استعمال (المعادلات 2-11).

6. المعادلات : نريد إيجاد الزمن، ومعلوم لدينا المسافة والتسارع. إن (المعادلة 2-11 ب) مناسبة؛ حيث إن الكمية الوحيدة المجهولة هي الزمن t. ضع $v_0 = 0$ و $x_0 = 0$ في هذه المعادلة $\left(x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2\right)$ لتحصل على الزمن t:

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

$$t^2 = \frac{2x}{a}$$

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a}}$$

7. الحساب:

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a}} = \sqrt{\frac{2(30.0\ \text{m})}{2.00\ \text{m/s}^2}} = 5.48\ \text{s}$$

وهذا هو الحل . لاحظ أن وحدة القياس صحيحة.

حل المسألة

تأكد من إجابتك

8. نختبر الآن معقولية الحل، وذلك من خلال حساب السرعة النهائية.
$v = at = (2.00\ \text{m/s}^2)(5.48\ \text{s}) = 10.96\ \text{m/s}$ ثم نجد $x = x_0 + \bar{v}t$ ، أي أن $0 + \frac{1}{2}(10.96\ \text{m/s} + 0)(5.48\ \text{s}) = 30.0\ \text{m}$ وهذه هي المسافة التي أعطيت في المسألة.

9. نختبر وحدات القياس؛ حيث نجد أنها صحيحة (الثواني).

ملحوظة: في الخطوتين 6 و 7 عندما أُخذ الجذر التربيعي، كان من المفترض أن نكتب . ومن وجهة نظر رياضية، فإن هناك حلين. لكن الحل الثاني $t = -5.48\ \text{s}$ هو الزمن الذي قبل المدّة الزمنية التي اخترناها، وهذا يعني أنه ليس له معنى فيزيائياً، وبذا فإنه يهمل.

$$t = \pm\sqrt{2x/a} = \pm\ 5.48\ \text{s}$$

لقد اتبعنا الخطوات التي وضعت في " الإطار الخاص لحل مسألة ما" عند حل (المثال 2-7). وفي الأمثلة اللاحقة سوف نستعمل طريقة الحل الاعتيادية حتى لا يكون هناك إسهاب.

المثال 2-8 قدّر الأكياس الهوائية

تطبيق الفيزياء

أكياس الهواء في السيارة

افترض أنك تريد تصميم نظام للأكياس الهوائية التي تحمي السائق في أثناء تصادم مباشر بسرعة 100 km/h (تقريبًا 60 mph). قدّر الزمن الذي يجب أن ينتفخ (الشكل 2 - 14) خلاله كيس الهواء حتى يحمي السائق على نحو فاعل. بيّن كيف أن استعمال حزام الأمان يساعد السائق أيضاً.

النهج: نفترض أن التسارع ثابت تقريبًا، وعليه يمكن استعمال (المعادلات 2 - 11). تحتوي (المعادلتان 2 - 11 أ،ب) على الزمن، وهو الكمية المطلوب إيجادها. كما أن هاتين المعادلتين تحتويان على التسارع الذي يمكن إيجاده من خلال استعمال (المعادلة 2 - 11 جـ) إذا علمنا المسافة التي تُسحق خلالها السيارة نتيجة للتصادم، فمن المحتمل أن تكون هذه المسافة كتقدير تقريبي مترًا واحدًا. نختار المدّة الزمنية لتبدأ من اللحظة التي يحدث فيها التصادم بسرعة $v_0 = 100\ \text{km/h}$ ، وتنتهي عندما تتوقف السيارة $(v = 0)$ بعد متر واحد.

الحل: نحول السرعة الابتدائية المعطاة إلى وحدات النظام الدولي (SI):
$100\ \text{km/h} = 100 \times 10^3\ \text{m}/3600\ \text{s} = 28\ \text{m/s}$ ، ثم نجد التسارع من (المعادلة 2-11جـ)

$$a = -\frac{v_0^2}{2x} = -\frac{(28\ \text{m/s})^2}{2.0\ \text{m}} = -390\ \text{m/s}^2$$

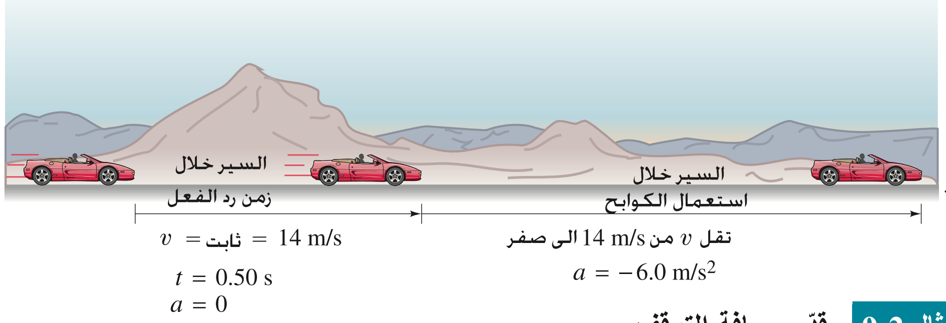
وهذا التسارع الهائل يحدث في زمن يُعطى (د):

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{0 - 28\ \text{m/s}}{-390\ \text{m/s}^2} = 0.07\ \text{s}$$

وهذا يعني أن كيس الهواء يجب أن ينتفخ قبل هذا الزمن حتى يكون فعالاً. ما الذي يقوم به كيس الهواء؟ إنه يوزع القوة على مساحة كبيرة من الصدر (حتى لا ينثقب الصدر من عجلة القيادة). إن حزام الأمان يبقي الشخص في وضع مستقر عندما ينتفخ كيس الهواء.



الشكل 2-14 ينتفخ كيس الهواء عند التصادم.



الشكل 2-15 المثال 2-9 مسافة التوقف لسيارة في أثناءاستعمال الكوابح

تطبيق الفيزياء
مسافات التوقف

المثال 2-9 قدّر مسافة التوقف

إن تقدير أقل مسافة توقف للسيارة أمر مهم للسلامة المرورية وتصميم حركة المرور. يتم التعامل مع هذه المشكلة في جزأين؛ أي مدّتين زمنيتين منفصلتين. (1) تبدأ المدّة الزمنية الأولى عندما يقرر السائق استعمال الكوابح، وتنتهي عندما تلمس قدمه دواسة الكوابح. وهذا هو "**زمن رد الفعل**" وتكون السرعة خلاله ثابتة؛ أي أن $(a = 0)$. (2) المدّة الزمنية الثانية هي المدّة الفعلية لاستعمال الكوابح عندما تتباطأ السيارة $(a \neq 0)$ ثم تتوقف. تعتمد مسافة التوقف على زمن رد الفعل للسائق والسرعة الابتدائية للسيارة (السرعة النهائية تساوي صفرًا) وتسارعها. إذا كانت الطريق جافة والإطارات جيدة، فإن الكوابح الجيدة تجعل السيارة تتباطأ بمعدل حوالي $5\ m/s^2$ إلى $8\ m/s^2$. احسب مسافة التوقف الكلية على اعتبار أن السرعة المتجهة الابتدائية للسيارة $50\ km/h\ (14\ m/s \approx 31\ mi/h)$ وأن تسارعها $-6.0\ m/s^2$ (إن السبب في ظهور إشارة السالب هو أننا اعتبرنا أن اتجاه السرعة على محور x الموجب وأن مقدارها يقل). زمن رد الفعل للسائق ربما يتراوح بين $0.3\ s$ إلى $1.0\ s$، دعنا نفترضه $0.50\ s$.

النهج: خلال المدّة الزمنية الأولى " زمن رد الفعل" تتحرك السيارة بسرعة ثابتة مقدارها $14\ m/s$، لذلك فإن $a = 0$. وخلال المدّة الزمنية الثانية عندما يتم الدوس على الكوابح، فإن التسارع $a = -6.0\ m/s^2$ ويكون ثابتًا خلال هذه المدّة. لكلا الجزأين التسارع ثابت، ولذا يمكن استعمال (المعادلات 2-11).

الحل: الجزء (1). افترض أن $x_0 = 0$ للجزء الأول من المسألة، الذي تتحرك خلاله السيارة بسرعة ثابتة مقدارها $14\ m/s$، خلال المدّة الزمنية التي يُظهر فيها السائق رد فعل $(0.50\ s)$ انظر إلى (الشكل 2-15) والجدول الذي في الهامش.

لا يمكن استعمال (المعادلة 2-11 جـ) لإيجاد x؛ أي موضع السيارة عند اللحظة $t = 0.50\ s$ (عند بدء استعمال الكوابح)؛ لأنها تحتوي على الحد a ، x الذي يساوي صفرًا. لذلك نجد أن (المعادلة 2-11ب) تفي بالمطلوب:

$$x = v_0 t + 0 = (14\ m/s)(0.50\ s) = 7.0\ m$$

وهذا يعني أن السيارة تقطع مسافة $7.0\ m$ خلال زمن رد الفعل للسائق، وحتى يستعمل الكوابح سوف نستعمل هذه النتيجة كمدخل للجزء (2).

الجزء (2) لنعتبر الآن المدّة الزمنية الثانية التي يتم خلالها الدوس على الكوابح وتتوقف السيارة. الموضع الابتدائي $x_0 = 7.0\ m$ (نتيجة الجزء(1)) والمتغيرات الأخرى مبينة في الجدول الذي في الهامش. لا تحتوي (المعادلة 2-11 أ) على x، و(المعادلة 2-11 ب) تحتوي على x والمجهول t. أما (المعادلة 2-11 جـ) $v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$ فهي المناسبة للحل. بعد أن نضع $x_0 = 7.0\ m$ نقوم بحل المعادلة بالنسبة إلى x؛ أي الموضع النهائي للسيارة (عندما تتوقف):

$$x = x_0 + \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$
$$= 7.0\ m + \frac{0 - (14\ m/s)^2}{2(-6.0\ m/s^2)} = 7.0\ m + \frac{-196\ m^2/s^2}{-12\ m/s^2}$$
$$= 7.0\ m + 16\ m = 23\ m$$

وهذا يعني أن السيارة تقطع $7.0\ m$ خلال زمن رد الفعل للسائق، بالإضافة إلى $16\ m$ خلال مدّة الدوس على الكوابح قبل أن تتوقف السيارة. وهكذا فإن المسافة الكلية التي قطعتها السيارة $23\ m$. يبين (الشكل 2-16) رسماً بيانياً للسرعة v مقابل الزمن t. لاحظ أن السرعة v ثابتة من $t = 0$ إلى $t = 0.50\ s$، ثم تقل بعد ذلك على نحو خطي حتى تصبح صفرًا.

ملحوظة: نلاحظ من المعادلة أعلاه التي للموضع x أن المسافة التي تقطعها السيارة بعد الضغط على الكوابح $(= x - x_0)$ تزداد، ليس فقط خطيًا مع السرعة الابتدائية، وإنما مع مربع السرعة الابتدائية أيضًا. لذلك إذا كنت تسير بضعفي السرعة فإنك تحتاج إلى أربعة أضعاف المسافة كي تتوقف.

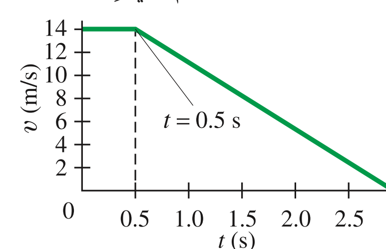
الجزء 1: زمن رد الفعل

المعلوم	المجهول
$t = 0.50\ s$	x
$v_0 = 14\ m/s$	
$v = 14\ m/s$	
$a = 0$	
$x_0 = 0$	

الجزء 2: استعمال الكوابح

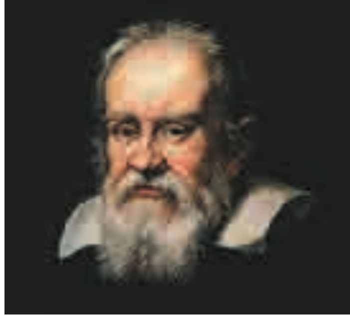
المعلوم	المجهول
$x_0 = 7.0\ m$	x
$v_0 = 14\ m/s$	
$v = 0$	
$a = -6.0\ m/s^2$	

الشكل 2-16 المثال 2-9. رسم بياني لِـ v مقابل t.



إن تحليل الحركة الذي تمت مناقشته في هذا الفصل هو في الأساس جبري. ومن المفيد في بعض الأحيان استخدام التفسير البياني أيضًا: انظر إلى البند الاختياري 2-8.

7-2 السقوط الحر للأجسام



الشكل 2 - 17 غاليليوغالي (1564-1642)

أحد الأمثلة الأكثر شيوعًا على الحركة بتسارع ثابت هي تلك التي يُسمح بها للجسم بالسقوط حرًّا بالقرب من سطح الأرض. وقد لا يكون واضحًا في البداية أن الجسم الساقط يتسارع، ولكن حذار من التفكير كما كان يُعتقد على نطاق واسع، حتى جاء غاليليو (الشكل 2-17)، الذي أشار إلى أن الأجسام الأثقل تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الخفيفة، وأن السرعة التي يسقط بها الجسم تتناسب مع كتلته.

إن تحليل غاليليو للأجسام الساقطة مبني على استخدام أسلوب جديد ومبتكر، لتخيّل ما سيحدث في الحالات المثالية (المبسّطة). افترض غاليليو أن الأجسام جميعها في حالة السقوط الحر تسقط بالتسارع الثابت نفسه في غياب الهواء أو أي مقاومة أخرى. وقد بيّن أن هذه الفرضية تنبأ بأن الجسم الذي يسقط من السكون يقطع مسافة تتناسب مع مربع الزمن (الشكل 2 - 18)؛ أي أن $d \propto t^2$. يمكننا ملاحظة ذلك من (المعادلة 2 - 11 ب)، ولكن غاليليو كان أول من اشتق هذه العلاقة الرياضية [من بين الإسهامات العظيمة التي قدمها غاليليو للعلوم وضع علاقات رياضية من هذا القبيل والإصرار على نتائج التجارب التي يمكن أن يتم التحقق منها كميًّا $d \propto t^2$].

وقد استخدم غاليليو طريقة ذكية لدعم صحة ادّعائه: إن الأجسام الساقطة تزداد سرعتها كلما سقطت للأسفل؛ حيث بيّن أن الحجر الثقيل الذي يسقط على وتد من ارتفاع 2 m يغرزه في الأرض مسافة أبعد بكثير من تلك التي يسببها الحجر نفسه عندما يسقط من ارتفاع 0.2 m فقط. وهكذا يتضح أن الحجر في الحالة الأولى يتحرك بسرعة أكبر من الحالة الثانية.

! تنويه

سرعة الجسم الساقط لا تتناسب مع كتلته أو وزنه.



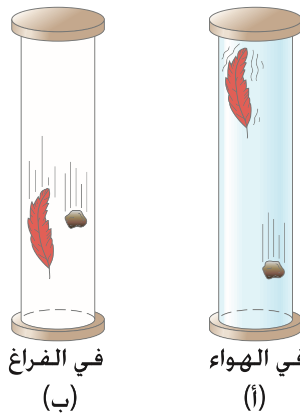
الشكل 2-18 صورة فوتوغرافية متكررة خلال مُدَدٍ زمنية متساوية تبين سقوط حبة تفاح. تسقط التفاحة مسافة أكبر خلال كل مدّة متعاقبة، وهذا يعني أنها تتسارع.

رأينا كذلك أن غاليليو افترض أن الأجسام جميعها، سواء أكانت خفيفة أم ثقيلة تسقط بالتسارع نفسه، على الأقل في غياب مقاومة الهواء. فإذا حملت قطعة ورق أفقيًّا بإحدى يديك، وحملت باليد الأخرى جسماً ثقيلاً مثل كرة ثم تركتهما في آن معاً، كما في (الشكل 2 - 19 أ) فإن الجسم الثقيل سوف يصل إلى الأرض أولاً. ولكن إذا كررت التجربة مرة أخرى بحيث تجعل الورقة هذه المرة على شكل كومة أو رزمة صغيرة (انظر الشكل 2 - 19 ب) فسوف تجد أن الجسمين يصلان إلى الأرضية في الوقت نفسه تقريبًا.

كان غاليليو على يقين من أن الهواء يعمل على مقاومة حركة الأجسام الخفيفة جدًا، التي مساحة سطحها واسعة. ولكننا في كثير من الحالات نهمل مقاومة الهواء. فإذا أجريت التجربة في غرفة تمت إزالة الهواء منها، فإن الأجسام الخفيفة مثل ريشة أو قطعة ورق سوف تسقط جميعها بالتسارع نفسه مثل أي جسم آخر (انظر الشكل 2 - 20). لم يكن ممكنًا إجراء مثل هذه التجربة في الفراغ في ذلك الوقت ، وهو ما جعل إنجاز غاليليو عظيمًا على مر العصور. يسمى غاليليو عادة بأنه "أبا العلم الحديث" ليس فقط بالنسبة إلى مساهماته العلمية (اكتشافات فلكية، القصور الذاتي، السقوط الحر) ولكن أيضًا لأسلوبه أو نهجه العلمي (التبسيط، التعبير الرياضي للنظرية، النظريات التي يمكن اختبار نتائجها، التجارب التي تختبر ما تتنبأ به النظريات).



الشكل 2-19 (أ) كرة وقطعة ورق خفيفة تسقطان في آنٍ معاً. (ب) إعادة للتجربة، ولكن بجعل الورقة على شكل كومة أو رزمة صغيرة.



الشكل 2-20 يتم إسقاط حجر صغير وريشة في وقت واحد (أ) في الهواء (ب) في الفراغ

فرضية غاليلو: يحدث السقوط الحر بتسارع ثابت g.

إن إسهام غاليليو في فهمنا لحركة الأجسام الساقطة يمكن تلخيصه على النحو التالي:
" في موقع ما على الأرض وفي حال عدم وجود مقاومة للهواء، فإن الأجسام جميعها تسقط بالتسارع نفسه".

نسمي هذا التسارع " **تسارع الجاذبية الأرضية**" على الأرض، ويرمز إليه بالحرف "g" ومقداره تقريباً:

التسارع بسبب الجاذبية الأرضية.

$$g = 9.80 \text{ m/s}^2 \quad \text{[على سطح الأرض]}$$

وأما في الوحدات البريطانية للقياس فتبلغ قيمة g حوالي 32 ft/s^2. وتختلف قيمة g قليلاً باختلاف خطوط الطول والارتفاع، ولكن هذا الاختلاف صغير بحيث يمكن إهماله في معظم الحالات. إن تأثير مقاومة الهواء غالبًا ما يكون صغيراً ما يدفعنا إلى إهماله في معظم الأحيان. ومع ذلك، فإن تأثير مقاومة الهواء يصبح ملحوظاً على الأجسام الثقيلة إذا أصبحت السرعة كبيرة*. إنّ تسارع الجاذبية الأرضية كمية متجهة مثل أي تسارع ، ويكون اتجاهه نحو مركز الأرض.

حل المسألة

اختار y ليكون موجبًا نحو الأعلى أو نحو الأسفل

عندما نتعامل مع الأجسام التي تسقط سقوطًا حرًا، فيمكننا استعمال (المعادلات 2-11) حيث نضع g محل a. وبما أن الحركة عمودية لذلك سوف نضع y بدلاً من x و y_0 بدلاً من x_0. سوف نعتبر $y_0 = 0$ ما لم ينُصّ على غير ذلك. ومن الممكن اختيار y لتكون موجبة للأعلى أو للأسفل، ولكن يجب أن نتقيد بذلك خلال حل كامل المسألة.

المثال 2-10 السقوط من البرج

السقوط يعني $v_0 = 0$.

سقطت كرةً من أعلى برج ارتفاعه 70.0 m. إلى أي مدى تكون الكرة قد انخفضت من أعلى البرج بعد مرور $t_1 = 1.00 \text{ s}$ و $t_2 = 2.00 \text{ s}$ و $t_3 = 3.00 \text{ s}$؟

النهج: دعنا نفترض أن y تكون موجبة للأسفل. نهمل مقاومة الهواء. وعليه فإن التسارع $a = g = +9.80 \text{ m/s}^2$، وهو موجب لأننا اخترنا الاتجاه للأسفل موجبًا. نضع الآن $v_0 = 0$ و $y_0 = 0$. نريد الآن تحديد الموضع y للكرة بعد مرور ثلاث مُدَدٍ زمنية مختلفة. تصبح (المعادلة 2 - 11 ب) مناسبة للحل بعد وضع y مكان x لأنها تربط بين الكميات المعلومة (t, a, v_0) والكمية المجهولة y.

الحل: نضع $t = t_1 = 1.00 \text{ s}$ في (المعادلة 2 - 11 ب)

$$y_1 = v_0 t_1 + \tfrac{1}{2} a t_1^2$$

$$= 0 + \tfrac{1}{2} a t_1^2 = \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(1.00 \text{ s})^2 = 4.90 \text{ m}$$

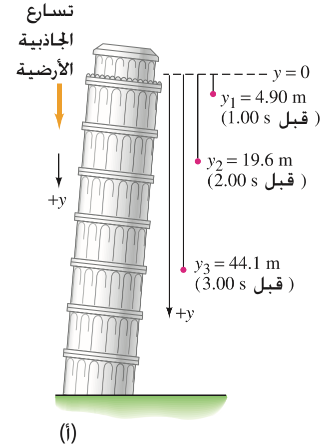
أي أن الكرة قطعت مسافة مقدارها 4.90m خلال المدّة الزمنية $t = 0$ إلى $t_1 = 1.00 \text{ s}$.
وبالمثل فبعد مرور $(= t_2)\ 2.00 \text{ s}$ يكون موضع الكرة هو

$$y_2 = \tfrac{1}{2} a t_2^2 = \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ s})^2 = 19.6 \text{ m}$$

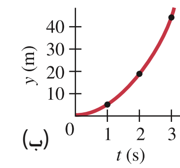
أخيراً، بعد مرور $(= t_3)\ 3.00 \text{ s}$ يكون موضع الكرة هو (انظر الشكل 2 - 21)

$$y_3 = \tfrac{1}{2} a t_3^2 = \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(3.00 \text{ s})^2 = 44.1 \text{ m}$$

ملحوظة: عندما نقول " سقط الجسم"، فهذا يعني أن $v_0 = 0$.



(أ)



(ب)

الشكل 2-21 (المثال 2-10)
(أ) الجسم الذي يُلقى به من برج يسقط بسرعة تزداد تدريجيًا ويقطع مسافة أكبر في كل ثانية متعاقبة.
(ب) مخطط بياني لـ y مقابل t.

المثال 2-11 قذف جسم نحو الأسفل من برج

افترض أن الكرة التي في (المثال 2-10) قد قذفت نحو الأسفل بسرعة متجهة ابتدائية 3.00 m/s بدلاً من أن تسقط من السكون. (أ) ما موضع الكرة بعد مرور 1.00 s و 2.00 s؟ (ب) ما سرعة الكرة بعد 1.00 s و 2.00 s؟ قارن سرعتها مع سرعة الكرة التي تسقط من السكون.

النهج: يمكننا اتباع الطريقة نفسها التي في (المثال 2 - 10). استعمل (المعادلة 2 - 11 ب)، ولكن تذكر أن v_0 لا تساوي صفرًا وإنما $v_0 = 3.00 \text{ m/s}$.

الحل: (أ) عند اللحظة $t = 1.00 \text{ s}$ فإن موضع الكرة باستعمال (المعادلة 2 - 11 ب) يساوي:

$$y = v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2 = (3.00 \text{ m/s})(1.00 \text{ s}) + \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(1.00 \text{ s})^2 = 7.90 \text{ m}$$

عند اللحظة $t = 2.00\ s$ (المدّة الزمنية $t = 0$ إلى $t = 2.00 \text{ s}$) يكون موضع الكرة:

$$y = v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2 = (3.00 \text{ m/s})(2.00 \text{ s}) + \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ s})^2 = 25.6 \text{ m}$$

كما هو متوقع، فإن الكرة تقطع في كل ثانية مسافة أكبر من تلك التي تقطعها الكرة نفسها فيما لو سقطت من السكون $v_0 = 0$.

* إن سرعة الجسم الذي يسقط في الهواء (أو في سوائل أخرى) لا تزداد على نحو لانهائي. فإذا سقط الجسم من ارتفاع عالٍ بما فيه الكفاية فإنه يصل إلى سرعة قصوى تسمى السرعة الحدية؛ وذلك بسبب مقاومة الهواء.

(ب) نحصل على السرعة المتجهة من (المعادلة 2-11أ):

$$v = v_0 + at$$

$$[\text{عند اللحظة } t_1 = 1.00\ \text{s}] \quad = 3.00\ \text{m/s} + (9.80\ \text{m/s}^2)(1.00\ \text{s}) = 12.8\ \text{m/s}$$

$$[\text{عند اللحظة } t_2 = 2.00\ \text{s}] \quad = 3.00\ \text{m/s} + (9.80\ \text{m/s}^2)(2.00\ \text{s}) = 22.6\ \text{m/s}$$

في (المثال 2-10) عندما سقطت الكرة من السكون ($v_0 = 0$) كان الحد الأول لهذه المعادلة صفرًا، لذلك نجد أن:

$$v = 0 + at$$

$$[\text{عند اللحظة } t_1 = 1.00\ \text{s}] \quad = (9.80\ \text{m/s}^2)(1.00\ \text{s}) = 9.80\ \text{m/s}$$

$$[\text{عند اللحظة } t_2 = 2.00\ \text{s}] \quad = (9.80\ \text{m/s}^2)(2.00\ \text{s}) = 19.6\ \text{m/s}$$

ملحوظة: في (المثالين 2-10 و 2-11) تزداد السرعة خطيًا مع الزمن بمقدار 9.80 m/s خلال كل ثانية. ولكن عند أي لحظة تكون سرعة الكرة التي تقذف للأسفل أكثر بمقدار 3.00 m/s (سرعتها الابتدائية) من سرعة الكرة التي تسقط من السكون (سرعتها الابتدائية صفر).

المثال 2-12 قذف كرة إلى الأعلى I:

قذف شخص كرة إلى الأعلى في الهواء وبسرعة متجهة ابتدائية 15.0 m/s. احسب: (أ) أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة. (ب) الزمن الذي تستغرقه الكرة وهي في الهواء وقبل أن تعود إلى يده.

النهج: إن ما يهمنا هنا ليس عملية قذف الكرة، ولكن حركتها بعد أن تغادر يد الشخص (الشكل 2-22) وحتى تعود إلى يده مرة أخرى. دعنا نختار المحور y ليكون موجبًا للأعلى وسالبًا للأسفل. (وهذا يختلف عن العرف الذي استعملناه في المثالين 2-10 و 2-11)، وفي هذه الحالة يكون تسارع الجاذبية الأرضية سالبًا؛ أي أن $a = -g = -9.80\ \text{m/s}^2$. عندما ترتفع الكرة للأعلى تقل سرعتها حتى تصل إلى أقصى ارتفاع (النقطة B في الشكل 2-22) حيث تصبح سرعتها صفراً للحظة، ثم تعود إلى الأسفل وتزداد سرعتها.

الحل: (أ) نأخذ المدّة الزمنية من اللحظة التي تغادر بها الكرة يد الشخص وحتى تصل إلى أقصى ارتفاع. ولتحديد أقصى ارتفاع؛ نحسب موضع الكرة عندما تكون سرعتها مساوية للصفر ($v = 0$ عند أقصى ارتفاع). عند $t = 0$ (النقطة A في الشكل 2-22) $y_0 = 0,\ v_0 = 15.0\ \text{m/s}$ و $a = -9.80\ \text{m/s}^2$. أما عند الزمن t (أقصى ارتفاع) فان $v = 0$ و$a = -9.80\ \text{m/s}^2$ ونريد إيجاد y . نستعمل (المعادلة 2-11 جـ) بعد أن نضع y محل x فيكون لدينا ومن ثَمَّ نقوم بحلها بالنسبة إلى y

$$y = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (15.0\ \text{m/s})^2}{2(-9.80\ \text{m/s}^2)} = 11.5\ \text{m}$$

أي أن الكرة تصل إلى ارتفاع 11.5 m فوق يد الشخص.

(ب) الآن، نحتاج إلى اختيار مدّة زمنية مختلفة لحساب الزمن الذي تستغرقه الكرة وهي في الهواء وقبل أن تعود إلى يده. يمكننا حساب ذلك في جزأين: أولاً، نحدد الزمن الذي تحتاج إليه الكرة حتى تصل إلى أقصى ارتفاع، ومن ثم نحدد الزمن الذي تستغرقه حتى تعود إلى الأسفل. وعلى أي حال، إن من الأسهل اعتبار المدّة الزمنية لكل الحركة من A إلى B إلى C (الشكل 2-22) في خطوة واحدة واستعمال (المعادلة 2-11ب). ويمكننا عمل ذلك لأن y (أو x) تمثل الموضع أو الإزاحة وليس المسافة التي قطعتها الكرة. لذلك عند كلتا النقطتين A و C تكون $y = 0$. باستعمال (المعادلة 2 - 11 ب) واعتبار $a = -9.80\ \text{m/s}^2$ نجد أن:

$$y = v_0 t_1 + \tfrac{1}{2} a t^2$$

$$0 = (15.0\ \text{m/s})t + \tfrac{1}{2}(-9.80\ \text{m/s}^2)t^2$$

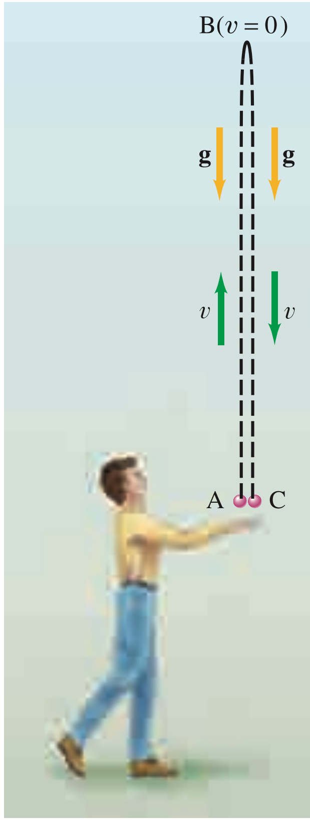
وبأخذ t عاملًا مشتركًا

$$(15.0\ \text{m/s} - 4.90\ \text{m/s}^2\, t)\, t = 0$$

هناك حلّان

$$t = \frac{15.0\ \text{m/s}}{4.90\ \text{m/s}^2} = 3.06\ \text{s} \quad \text{و} \quad t = 0$$

الحل الأول ($t = 0$) يقابل نقطة البداية (A) في (الشكل 2-22) عندما قذفت الكرة من الموقع $y = 0$. والحل الثاني $t = 3.06\ \text{s}$ ويقابل النقطة C عندما تكون الكرة قد عادت إلى الموقع $y = 0$. لذلك فإن الكرة تبقى في الهواء مدّة 3.06 s .



الشكل 2-22 الجسم الذي يقذف في الهواء يغادر يد الشخص عند A، ويصل إلى أقصى ارتفاع عند B، ثم يعود إلى موضعه الأصلي عند C. الأمثلة 2-12 و 2-13 و 2-14 و 2-15

لاحظ أن عملية قذف الكرة لم تؤخذ بالحسبان في هذا المثال. لماذا؟ لأنه خلال قذف الشخص للكرة كانت يده تلمسها. وهو ما يجعلها تتسارع بمعدل غير معلوم بالنسبة لنا (التسارع لا يساوي g). وبذا نعتبر فقط الزمن الذي تستغرقه الكرة في الهواء حيث يكون التسارع g.

ومن الناحية الرياضية، فإنّ كل معادلة تربيعية (حيثما يكون المتغير تربيعًا) لها حلّان. في الفيزياء أحيانًا حل واحد فقط يتوافق مع الحالة الحقيقية، كما في (المثال 2-7) حيث أهملنا الحل غير الفيزيائي. ولكن في (المثال 2-12) لكلٍّ من الحلّين معنى فيزيائي: $t = 0$ و $t = 3.06\ s$.

تنويه !

المعادلات التربيعية لها حلان، يتوافق أحدهما أحيانا مع الواقع فقط، وأحيانا أخرى يتوافق كلاهما.

المثال المفاهيمي 2-13 أخطاء مفاهيمية محتملة

أعط أمثلة توضح الخطأ في الأخطاء المفاهيمية التالية: (1) التسارع والسرعة المتجهة دائمًا ما يكونان في الاتجاه نفسه. (2) الجسم الذي يقذف إلى الأعلى يكون تسارعه صفراً عند أعلى نقطة يصل إليها.

الحل: كلاهما خطأ (1) ليس من الضروري أن تكون السرعة المتجهة والتسارع دائمًا في الاتجاه نفسه. عندما تتحرك الكرة التي في (المثال 2-12) نحو الأعلى، فإن سرعتها موجبة (للأعلى)، في حين أن التسارع سالب (للأسفل). (2) عند أعلى نقطة B في الشكل 2-22) تكون السرعة المتجهة للكرة صفرًا للحظة. هل التسارع صفر أيضًا عند هذه النقطة؟ لا، يكون اتجاه السرعة عند قمة القوس للأعلى، ثم تصبح السرعة صفرًا (للزمن صفر) عند أعلى نقطة، ثم ينعكس اتجاه السرعة نحو الأسفل. ولكن الجاذبية لا يتوقف تأثيرها، لذلك فإن $a = -g = -9.80\ m/s^2$ حتى عند تلك النقطة. إن الاعتقاد بأن $a = 0$ عند النقطة B يقود إلى الاستنتاج بأن الكرة عندما تصل إلى B سوف تستقر هناك؛ إذا كان التسارع (معدل تغير السرعة المتجهة) صفراً، فإن السرعة المتجهة تبقى صفراً عند أعلى نقطة، لذا فإن الكرة تستقر في الأعلى من غير أن تسقط. وباختصار، فإن تسارع الجاذبية الأرضية يتجه دائما إلى الأسفل نحو الأرض حتى عندما يتحرك الجسم إلى الأعلى.

تنويه !

(1) السرعة المتجهة والتسارع لا يكونان دائما في الاتجاه نفسه؛ يتجه تسارع الجاذبية دائما إلى الأسفل.
(2) $a \neq 0$ حتى عند أعلى نقطة على المسار

المثال 2-14 قذف كرة إلى الأعلى II

دعنا نتناول الكرة التي قذفت إلى الأعلى في (المثال 2-12)، ونجري بعض الحسابات الإضافية. احسب:(أ) الزمن الذي تستغرقه الكرة حتى تصل إلى أقصى ارتفاع (النقطة B في الشكل 2-22). (ب) السرعة المتجهة للكرة عندما تعود إلى يد الشخص (النقطة C).

النهج: نفترض مرة أخرى أن التسارع ثابت، لذلك يمكن استعمال (المعادلات 2-11). معلوم لدينا أن الارتفاع 11.5m (من المثال 2-12). افترض أن y موجبة في الاتجاه الذي للأعلى.

الحل: (أ) نفترض المدّة الزمنية بين قذف الكرة $(t = 0, v_0 = 15.0\ m/s)$ ووصولها إلى قمة المسار (حيث $y = +11.5\ m,\ v = 0$) ونريد إيجاد الزمن t: التسارع ثابت ويساوي $a = -g = -9.80\ m/s^2$. (المعادلتان 2-11 أ و 2-11 ب) كلتاهما تشتمل على الزمن t بالإضافة إلى الكميات الأخرى المعلومة. لنستعمل (المعادلة 2 - 11أ) والمعطيات $a = -9.80\ m/s^2$ و $v_0 = 15.0\ m/s$ و $v = 0$:

$$v = v_0 + at$$

ضع $v = 0$ وحل المعادلة بالنسبة إلى t نجد أن:

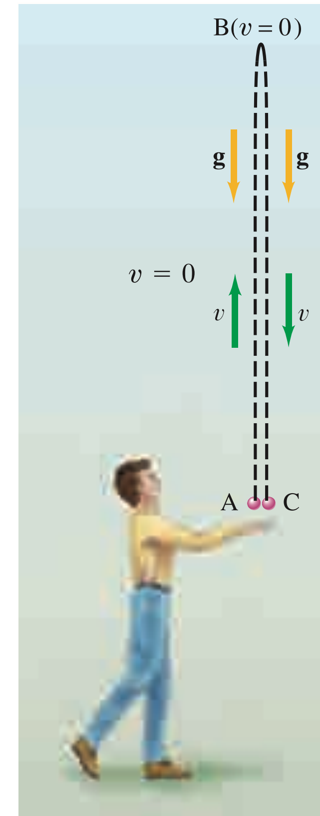
$$t = -\frac{v_0}{a} = -\frac{15.0\ m/s}{-9.80\ m/s^2} = 1.53\ s$$

وهذا يمثل نصف الزمن فقط الذي تحتاج إليه الكرة حتى تصعد إلى الأعلى وتعود ثانية إلى يد الشخص الذي قذفها [3.06 s كما تم حسابه في فرع (ب) للمثال 2 - 12] . وهكذا فإن الزمن الذي تحتاج إليه الكرة للوصول إلى أقصى ارتفاع هو الزمن نفسه الذي تحتاج إليه حتى تسقط وتعود إلى نقطة البداية.

(ب) الآن، نفترض المدّة الزمنية بين لحظة قذف الكرة ($t = 0$ و $v_0 = 15.0\ m/s$) ، وحتى تعود إلى يد الشخص، والتي حدثت خلال $t = 3.06\ s$ (كما تم حسابها في الفرع (ب) من المثال 2 - 12) ، ونريد إيجاد السرعة المتجهة v عندما $t = 3.06\ s$:

$$v = v_0 + at = 15.0\ m/s - (9.80\ m/s^2)(3.06\ s) = -15.0\ m/s$$

ملحوظة: إن مقدار السرعة المتجهة عندما تعود الكرة إلى نقطة البداية هو نفسه عندما قُذفت، ولكن بالاتجاه المعاكس (وهذا هو معنى الإشارة السالبة). وهكذا، كما استنتجنا من الفرع (أ) فإن الحركة متماثلة حول أقصى ارتفاع.



الشكل 2-22 مكرر للأمثلة 2-13 و 2-14 و 2-15

لاحظ التماثل: السرعة عند أي ارتفاع هي نفسها عندما تنطلق إلى الأعلى كما هي الحال عندما تسقط نحو الأسفل (ولكن الاتجاه متعاكس).

التمرين جـ: قذفت كرتان من أعلى منحدر صخري شاهق. إحداهما قذفت إلى الأعلى مباشرة والأخرى إلى الأسفل مباشرة. كلتا الكرتين لهما السرعة الابتدائية نفسها، وارتطم كلّ منهما بالأرض أسفل المنحدر. أي من الكرتين ترتطم بالأرض بسرعة أكبر: الكرة التي قذفت إلى الأعلى، أم الكرة التي قذفت إلى الأسفل، أم أن الكرتين لهما السرعة نفسها عند الارتطام بالأرض؟ أهمل مقاومة الهواء [تلميح: انظر إلى نتيجة المثال 2 - 14، فرع ب].

اتمثيل التسارع بـ g

إن تسارع الأجسام مثل الصواريخ والطائرات السريعة غالبًا ما يُعطى بدلالة مضاعفات $g = 9.80\,\text{m/s}^2$. فعلى سبيل المثال، الطائرة التي تهبط جوًّا ثم ترتفع عالياً تتسارع بمقدار $3.00\,g$ وهو ما يعادل $(3.00)(9.80\,\text{m/s}^2) = 29.4\,\text{m/s}^2$.

التمرين د: إذا عُلم أن سيارة تتسارع بمقدار $0.50\,g$، فما تسارعها بوحدة m/s^2؟

مثال إضافي ــ استعمال الصيغة التربيعية

المثال 2-15 قذف كرة إلى الأعلى III

احسب الزمن الذي تستغرقه الكرة التي في (المثال 2 - 14) حتى تجتاز نقطة ترتفع $8.00\,\text{m}$ عن يد الشخص الذي قذفها.

النهج: نختار المدّة الزمنية من لحظة قذف الكرة $(t = 0,\ v_0 = 15.0\,\text{m/s})$ وحتى الزمن t (الذي سوف نجده) عندما تكون الكرة على ارتفاع $y = 8.00\,\text{m}$. نستعمل (المعادلة 2-11 ب).

الحل: نريد تحديد الزمن t، والمعطيات التي لدينا هي:

$$a = -9.80\,\text{m/s}^2 \text{ و } y = 8.00\,\text{m},\quad y_0 = 0,\quad v_0 = 15.0\,\text{m/s}$$

نستعمل (المعادلة 2-11 ب):

$$y = y_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

$$8.00\,\text{m} = 0 + (15.0\,\text{m/s})\,t + \tfrac{1}{2}(-9.80\,\text{m/s}^2)t^2$$

ولحل أي معادلة تربيعية شكلها العام $at^2 + bt + c = 0$؛ حيث a, b, c ثوابت (هنا a لا تمثل التسارع)، نستعمل القانون العام (انظر إلى الفهرس A-4):

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

نعيد الآن كتابة معادلتنا أعلاه لتأخذ الشكل العام $at^2 + bt + c = 0$

$$(4.90\,\text{m/s}^2)t^2 - (15.0\,\text{m/s})\,t + (8.00\,\text{m}) = 0$$

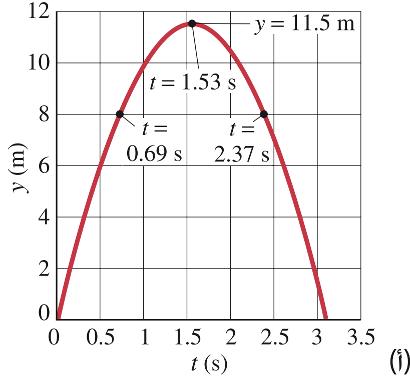
ومنها نجد أن المعامل a هو $4.90\,\text{m/s}^2$ ، و b هو $-15.0\,\text{m/s}$، و c هو $8.00\,\text{m}$. وبتعويضها في القانون العام نحصل على

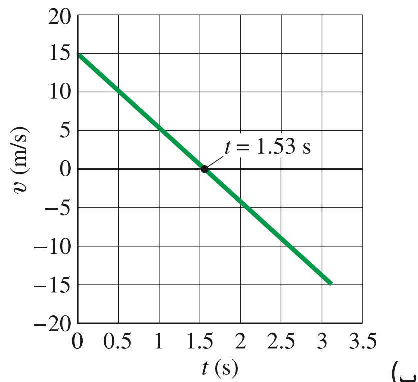
$$t = \frac{15.0\,\text{m/s} \pm \sqrt{(15.0\,\text{m/s})^2 - 4(4.90\,\text{m/s}^2)(8.00\,\text{m})}}{2(4.90\,\text{m/s}^2)}$$

الذي يعطينا $t = 0.69\,\text{s}$ و $t = 2.37\,\text{s}$. هل كلا الحلين صحيح؟ نعم؛ لأن الكرة تمرّ بالارتفاع $y = 8.00\,\text{m}$ مرتين : عندما ترتفع إلى الأعلى $(t = 0.69\,\text{s})$ وعندما تعود إلى الأسفل $(t = 2.37\,\text{s})$.

حل المسألة

استعمال المعادلة التربيعية





الشكل 2-23 الرسوم البيانية لكل من (أ) y مقابل t. (ب)v مقابل t للكرة التي قذفت إلى الأعلى في الأمثلة 2-12 و 2-14 و2-15.

بعض الطلّاب تساعدهم الرسوم البيانية على الفهم. يبين (الشكل 2-23) الرسم البياني لكل من y مقابل t و v مقابل t للكرة التي قذفت إلى الأعلى في (الشكل 2-22). ويشتمل (الشكل 2-23) على النتائج التي حصلنا عليها في (الأمثلة 2-12 و 2-14 و 2-15). وسوف نناقش الخصائص المفيدة للرسوم البيانية.

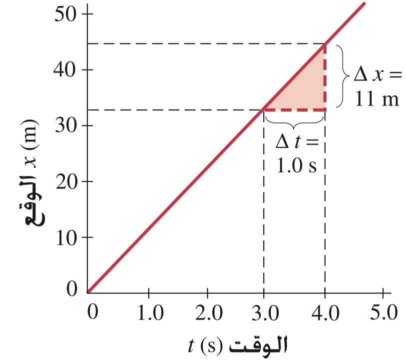
نستعمل كلمة عمودي كثيرًا في هذا الكتاب. فما المقصود بها؟ (حاول الحل قبل أن تتابع القراءة). يعرف العمودي على أنه الخط الذي يسقط عليه جسم ما. أو إذا ربطت كرة صغيرة بنهاية خيط وتركته يتدلى، فإن الخيط يمثل الخط العمودي (يسمى أحيانًا الرأسي أو الشاقولي).

* 8-2 التحليل البياني للحركة الخطية *

يوضح (الشكل 2 - 9) الرسم البياني للسرعة المتجهة التي تتحرك بها سيارة مقابل الزمن، وذلك لحالتين من الحركة الخطية هما: (1) الحالة التي تكون فيها السرعة المتجهة ثابتة. (2) الحالة التي يكون فيها مقدار السرعة المتجهة متغيرًا. إن من المفيد كذلك رسم العلاقة البيانية للموضع(y) x بدلالة الزمن، وذلك كما بينا في (الشكل 2 - 23 أ). وفي هذا الشكل، اعتبرنا الزمن متغيراً مستقلاً، وقِسناه على طول المحور الأفقي، أما الموضع x فهو المتغير التابع، وقد قِسناه على طول المحور العمودي.

دعنا الآن نعمل رسمًا بيانيًا يمثل x مقابل t ونختار $x_0 = 0$ عند $t = 0$. لنبدأ أولاً بسيارة تتحرك بسرعة متجهة ثابتة مقدارها 40 km/h وهو ما يعادل 11 m/s. تخبرنا (المعادلة 2 - 11 ب) أن $x = vt$، وهذا يعني أن x تزداد في كل ثانية بمقدار 11 m/s. لذلك فإن الموضع x يزداد خطيًا مع مرور الزمن. وعليه نجد أن الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t عبارة عن خط مستقيم، كما في (الشكل 2 - 24)؛ أي أن كل نقطة على هذا الخط تخبرنا عن موضع السيارة عند زمن معين. وعلى سبيل المثال، إن موضع السيارة عندما $t = 3.0\,s$ يساوي 33 m، وعندما $t = 4.0\,s$ تكون $x = 44$ m. إن المثلث الصغير (المظلل) الذي على الرسم البياني يمثل ميل الخط المستقيم، الذي يعرف على أنه التغير في المتغير التابع (Δx) مقسوماً على التغير المقابل في المتغير المستقل (Δt):

$$\text{الميل} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$



الشكل 2 - 24 رسم بياني للموضع مقابل الزمن لجسم يتحرك بسرعة متجهة منتظمة مقدارها 11 m/s.

السرعة المتجهة = ميل الرسم البياني الذي يُمثل x مقابل t

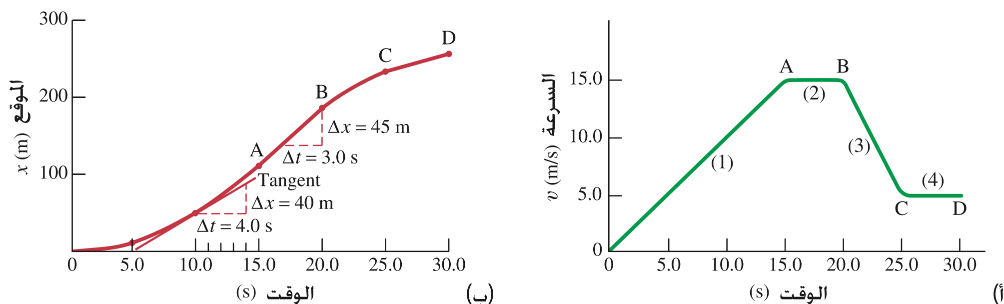
باستعمال تعريف متوسط السرعة المتجهة (المعادلة 2-2) نلحظ أن ميل الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t يساوي السرعة المتجهة. ويتضح لنا من المثلث الصغير الذي على الرسم البياني أن $\Delta x/\Delta t = (11\,m)/(1.0\,s) = 11\,m/s$ وهذه هي السرعة المعطاة.

إن ميل الرسم البياني الذي في (الشكل 2-24) هو نفسه في كل مكان إذا كانت السرعة المتجهة ثابتة. ولكن إذا تغيرت السرعة المتجهة، كما في (الشكل 2-25أ) فإن ميل الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t يتغير أيضًا. افترض على سبيل المثال حركة سيارة: (1) تتسارع من السكون بانتظام حتى تصبح سرعتها المتجهة 15 m/s في 15 s، وبعد ذلك (2) تتحرك مدّة 5.0 s بسرعة متجهة ثابتة مقدارها 15 m/s (3) وخلال 5.0 s التالية تتباطأ السيارة بانتظام حتى تصل سرعتها إلى 5.0 m/s، ثم (4) تبقى تتحرك بهذه السرعة المتجهة الثابتة. يبيّن الرسم البياني في (الشكل 2-25 أ) هذه السرعة المتجهة كدالة في الزمن. لإنشاء الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t نستعمل (المعادلة 2-11ب) $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$. بتسارع ثابت للمدّة الزمنية من $t = 0$ الى $t = 15\,s$ وكذلك للمدّة من $t = 20\,s$ إلى $t = 25\,s$، وأما للمدّة من $t = 15\,s$ إلى $t = 20\,s$ وكذلك بعد $t = 25\,s$ فتكون السرعة ثابتة، وبذا نضع $a = 0$ في هذه المعادلة. وتكون النتيجة رسماً بيانياً بين x و t كما في (الشكل 2-25 ب). فمن نقطة الأصل إلى النقطة A نلحظ أن الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t ليس خطاً مستقيماً ولكنه منحنى. يُعرف ميل المنحنى عند نقطة ما على أنه ميل المماس لذلك المنحنى عند تلك النقطة . (المماس عبارة عن خط مستقيم يرسم بحيث يلامس المنحنى عند نقطة فقط، ولكنه لا يقطع المنحنى ولا يمرّ خلاله). وعلى سبيل المثال، يرسم المماس للمنحنى الذي يمثل x مقابل t عند $t = 10.0\,s$ على الرسم البياني، كما في (الشكل 2 - 25ب). وقد رسم مثلث واختيرت t لتكون 4.0 s، أما Δx فيمكن إيجادها من الرسم البياني للمدّة الزمنية نفسها $\Delta t = 4.0$ s وقد وُجد أن $x\Delta = 40$ m. ولذلك فإن ميل المنحنى عند $t = 10.0\,s$ يساوي السرعة المتجهة اللحظية عند تلك اللحظة؛ أي أن: $v = \Delta x / \Delta t = 40\ m/4.0\ s = 10\ m/s$.

ميل المماس

* بعض البنود في هذا الكتاب (مثل هذا البند) يمكن اعتبارها اختيارية، وذلك حسب تقدير المدرس. لمزيد من التفاصيل، انظر إلى المقدمة.

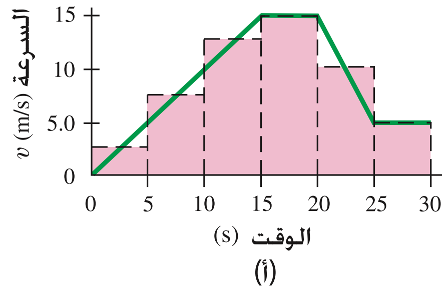
الشكل 2-25 (أ) السرعة المتجهة مقابل الزمن. (ب) الإزاحة مقابل الزمن لجسم يتحرك بسرعة متغيرة (انظر النص)



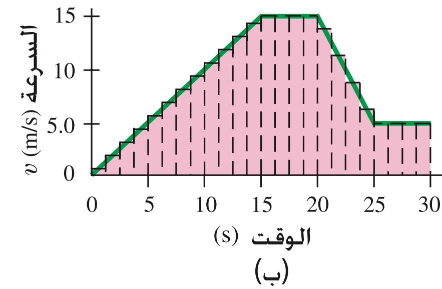
في المنطقة التي تقع بين A و B (الشكل 2 - 25 ب)، المنحنى الذي يمثل x مقابل t عبارة عن خط مستقيم؛ وذلك لأن الميل (يساوي السرعة المتجهة) ثابت. ويمكن إيجاد الميل باستعمال المثلث المبيّن على الشكل وللمدّة الزمنية التي تقع بين $t = 17\,s$ و $t = 20\,s$ حيث تصل الزيادة في x إلى 45 m: $\Delta x/\Delta t = 45\,m/3.0\,s = 15\,m/s$.

إن ميل المنحنى الذي يمثل x مقابل t عند أي نقطة هو $\Delta x/\Delta t$، حيث يساوي سرعة الجسم الذي نصف حركته عند تلك اللحظة. وبطريقة مماثلة، فإن الميل عند أي نقطة على المنحنى الذي يمثل v مقابل t يساوي $\Delta v/\Delta t$، ولذلك فهو (المعادلة 2-4) يساوي التسارع عند تلك اللحظة.

افترض أن لدينا الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t كما في (الشكل 2 - 25 ب). يمكننا إيجاد الميل عند عدد من النقاط، ثم نرسم بيانيًا ميل هذه النقاط كدالة في الزمن. وبما أن الميل يساوي السرعة المتجهة، لذا يمكننا إعادة إنشاء الرسم البياني الذي يمثل السرعة المتجهة مقابل الزمن t. وبكلمات أخرى، إذا كان لدينا الرسم البياني الذي يمثل x مقابل t فيمكننا تحديد السرعة المتجهة كدالة في الزمن باستعمال الطرق البيانية بدلاً من استعمال المعادلات. وهذا الأسلوب مفيد للغاية خصوصًا عندما يكون التسارع غير ثابت؛ حيث لا يمكن استعمال (معادلات الحركة 2 - 11).



(أ)



(ب)

الشكل 2 - 26 تم تحديد الإزاحة من الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t وذلك بحساب المساحات.

إذا كان الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t كما في (الشكل 2 - 25 أ)، فيمكننا تحديد الموضع x بدلالة الزمن باستعمال الطريقة البيانية التي سوف نوضحها من خلال تطبيقها على الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t (الشكل 2 - 25أ). نقسم المدّة الزمنية الكلية إلى مُدَدٍ جزئية، كما هو موضح في (الشكل 2-26 أ) الذي يبيّن ست مُدَدٍ فقط (الخطوط العمودية المقطعة). لكل مدّة جزئية يرسم خط أفقي مقطع ليشير إلى متوسط السرعة خلال كل مدّة منها. فعلى سبيل المثال، تزداد السرعة المتجهة خلال المدّة الأولى بمعدل ثابت من صفر إلى 5.0 m/s، ولذلك فإن $\bar{v} = 2.5\,m/s$، وفي المدّة الرابعة السرعة ثابتة 15 m/s أي أن $\bar{v} = 15\,m/s$ (لم يوضح الخط الأفقي المقطع لهذه المدّة في (الشكل 2 - 26 أ) لأنه ينطبق على المنحنى نفسه). أما الإزاحة (التغير في الموضع) خلال أي مدّة جزئية، فإنها خلال كل مدّة جزئية تساوي حاصل ضرب $\bar{v}$ و Δt، وهو ما يمثل مساحة المستطيل [الارتفاع×القاعدة $= \bar{v} \times \Delta t$] المظلل باللون الوردي لتلك المدّة. إن الإزاحة الكلية بعد مرور 25 s هي مجموع مساحات أول خمسة مستطيلات.

إذا كان التغير في السرعة المتجهة كبيراً، فإن من الصعب في هذه الحالة تقدير السرعة المتجهة المتوسطة من الرسم البياني. وللتقليل من هذه الصعوبة؛ نقسّم المدّة الزمنية إلى عدد كبير من المُدَدِ الزمنية الجزئية، وذلك بجعل Δt صغيرة جداً، كما في (الشكل2 - 26 ب). كلما زاد عدد المُدَدِ نحصل على تقريب أفضل. كما يمكن جعل Δt تقترب من الصفر، وهذا يؤدي إلى حساب التكامل الذي لم نناقشه هنا. وفي النتيجة، فإن الإزاحة الكلية بين أي زمنين تساوي المساحة التي تحت الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t بين هذين الزمنين.

الإزاحة = المساحة التي تحت الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t

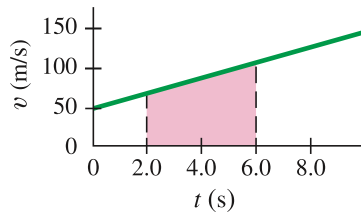
المثال 2-16 **الإزاحة باستعمال الرسم البياني v مقابل t** مسبار فضائي يتسارع على نحو منتظم من 50 m/s عندما $t=0$ إلى 150 m/s عندما $t = 10\,s$. فما إزاحته خلال المدّة $t = 2.0\,s$ و $t = 6.0\,s$؟

النهج: الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t موضح في (الشكل 2-27). نحتاج إلى حساب مساحة المنطقة المظللة التي تمثل شبه منحرف. المساحة تساوي معدل الارتفاعين (بوحدة السرعة) مضروبًا في العرض (وهو 4.0 s).

الحل: التسارع $a = (150\,m/s - 50\,m/s)/10\,s = 10\,m/s^2$. استعمل (المعادلة 2-11 أ) أو (الشكل 2 - 27) عند $t = 2.0\,s$ و $v = 70\,m/s$ وعند $t = 6.0\,s$ و v=110 m/s. وعليه فإن المساحة $(\bar{v} \times \Delta t)$، التي تساوي Δt هي:

$$\Delta x = \left(\frac{70\,m/s + 110\,m/s}{2}\right)(4.0\,s) = 360\,m$$

ملحوظة: لهذه الحالة التي يكون فيها التسارع ثابتاً يمكننا استعمال (المعادلة 2-11) لنحصل على النتيجة نفسها.



الشكل 2-27 (المثال 2-16). تمثل المساحة المظللة الإزاحة خلال المدّة الزمنية من $t = 2.0\,s$ إلى $t = 6.0\,s$.

وفي الحالات التي لا يكون فيها التسارع ثابتاً، فإن المساحة يمكن حسابها بِعَدِّ المربعات على ورقة رسم بياني.

ملخص

[تقدم الخلاصة التي تظهر في نهاية كل فصل من هذا الكتاب لمحة مختصرة للأفكار الرئيسة التي يشتمل عليها الفصل. ولكن لا يمكن أن تكون الخلاصة كافية للحصول على فهم كامل للمادة، الذي يمكن تحقيقه فقط بقراءة الفصل بالتفصيل].

- يتعامل **علم الحركة** مع وصف للكيفية التي تتحرك بها الأجسام. إن وصف حركة أي جسم يجب أن يعطى دائمًا بالنسبة إلى **إطار إسناد معين**.

- **الإزاحة** لأي جسم تمثل التغير في موضع الجسم .

- متوسط السرعة هو عبارة عن المسافة التي يقطعها جسم ما مقسومة على الزمن الذي يستغرقه أو المدّة الزمنية Δt التي اخترناها لعمل مشاهداتنا. أما متوسط **السرعة** المتجهة لجسم ما خلال مدّة زمنية معينة Δt فيساوي إزاحته Δx خلال هذه المدّة مقسومة على Δt

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad \text{(2-2)}$$

- **السرعة المتجهة اللحظية**، التي يساوي مقدارُها السرعةَ اللحظية، عبارة عن متوسط السرعة المتجهة خلال مدّة زمنية متناهية في الصغر.

- **التسارع** هو التغير في السرعة لكل وحدة زمنية. إن متوسط التسارع لجسم ما خلال مدّة زمنية Δt يساوي

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(4-2)}$$

حيث Δv تمثل التغير في السرعة خلال المدّة الزمنية Δt.

- التسارع اللحظي عبارة عن متوسط التسارع خلال مدّة زمنية متناهية في الصغر.

- إذا كان موضع الجسم x_0 وسرعته v_0 عند اللحظة $t = 0$ ثم تحرك الجسم في خط مستقيم بتسارع ثابت، فإن سرعة الجسم v وموضعه x بعد مرور زمن معين على حركته يرتبطان مع التسارع a والموضع الابتدائي x_0 والسرعة الابتدائية v_0 من خلال معادلات الحركة 2-11.

$$v = v_0 + at \qquad x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 \qquad \text{(11-2)}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \qquad \bar{v} = \frac{v + v_0}{2}$$

- الأجسام التي تتحرك عموديًا بالقرب من سطح الأرض وتسقط من السكون أو تقذف إلى الأعلى أو إلى الأسفل تتحرك **بتسارع** ثابت ناجم عن الجاذبية الأرضية، ومقداره، عند إهمال مقاومة **الهواء**، يساوي $g = 9.80\,\text{m/s}^2$. ويمكن تطبيق معادلات الحركة (2-11) بتسارع ثابت على الأجسام التي تتحرك نحو الأعلى أو الأسفل على نحو حر بالقرب من سطح الأرض.

- [* إن ميل المنحنى عند أي نقطة على رسم بياني هو ميل المماس لذلك المنحنى عند تلك النقطة. إذا كان الرسم البياني يمثل x مقابل t فإن الميل $\Delta x/\Delta t$ هو الذي يمثل السرعة عند تلك النقطة. أما المساحة التي تحت الرسم البياني الذي يمثل v مقابل t فتساوي الإزاحة بين أي زمنين تم اختيارهما].

أسئلـــة

1. هل مقياس السرعة في السيارة يقيس السرعة المتجهة أم السرعة أم كليهما؟

2. هل يمكن أن يكون للجسم سرعة متغيرة إذا كانت سرعته المتجهة ثابتة؟ إذا كان الحل نعم، فأعطِ أمثلة.

3. عندما يتحرك جسم بسرعة متجهة ثابتة، فهل متوسط سرعته المتجهة خلال أي مدّة زمنية يختلف عن سرعته اللحظية عند أي لحظة؟

4. في سباق السرعة بين السيارات، هل من الممكن للسيارة التي تسير بأكبر سرعة أن تعبر خط النهاية لتخسر السباق؟

5. إذا كان لجسم ما سرعة أكبر من جسم آخر، فهل من الضروري أن يكون للجسم الأول تسارع أكبر؟ فسّر باستعمال الأمثلة.

6. قارن تسارع دراجة نارية تتسارع من 80 km/h إلى 90 km/h مع تسارع دراجة هوائية تتسارع من السكون إلى 10 km/h في الزمن نفسه.

7. هل يمكن لجسم أن تكون سرعته نحو الشمال وتسارعه نحو الجنوب ؟ فسر ذلك.

8. هل يمكن أن تكون سرعة جسم سالبة عندما يكون تسارعه موجبًا؟ ماذا لو كان العكس.

9. أعط مثالا تكون فيه السرعة والتسارع سالبين.

10. تظهر سيارتان جنبًا إلى جنب من نفق. السيارة (أ) تتحرك بسرعة تساوي 60 km/h وتسارع 40 km/h/min. أما السيارة (ب) فتتحرك بسرعة تساوي 40 km/h. وتسارع 60 km/h/ min. أي السيارتين تجتاز الأخرى بعد خروجهما من النفق؟ فسر السبب.

11. هل يمكن لجسم أن تزداد سرعته في حين يتناقص تسارعه؟ إذا كان نعم، فأعطِ مثالاً وإذا كان ذلك غير ممكن، ففسّر السبب؟

12. يضرب لاعب بيسبول(كرة القاعدة) الكرة في الهواء مباشرة نحو الأعلى. وتغادر الكرة المضرب بسرعة 120 km/h. في غياب مقاومة الهواء، ما السرعة التي تتحرك بها الكرة عندما يلتقطها لاعب آخر في الميدان؟

13. عندما يسقط جسم سقوطاً حراً تزداد سرعته، فما الذي يحدث لتسارعه بسبب الجاذبية، هل يزداد، أم يقل، أم يبقى ثابتاً؟

14. كيف يمكنك تقدير أقصى ارتفاع تصل إليه كرة عندما تقذفها عموديًا نحو الأعلى؟ كيف يمكنك تقدير أقصى سرعة تمنحها للكرة؟

15. افترض أنك سافرت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) بواسطة سيارة تتحرك بسرعة ثابتة تساوي 70 km/h. ثم سافرت المسافة نفسها من النقطة (ب) إلى نقطة أخرى (جـ) وبسرعة ثابتة تساوي 90 km/h. هل متوسط سرعتك للرحلة كاملة من (أ) إلى (جـ) يساوي 80 km/h؟ فسر فيما إذا كان الحل نعم أو لا.

16. في عرض خلال محاضرة، يسقط من سقف قاعة المحاضرة خيط عمودي طوله 3.0-m يربط به عشرة مسامير على أبعاد متساوية. يسقط هذا الخيط على صفيحة من القصدير، ويسمع الطلاب ارتطام كل مسمار مع الصفيحة. هذه الأصوات لا تسمع على مُدٍ متساوية. علّل؟ هل يزداد الزمن بين الأصوات أم يقل عند اقتراب نهاية الخيط؟ كيف يجب ربط المسامير بحيث نسمع أصواتاً في أزمان متساوية؟

17. أيّ من الحركات التالية لا تُعدّ تسارعًا ثابتًا: *حجر يسقط من أعلى جرف صخري شاهق. * مصعد يتحرك من الطابق الثاني إلى الخامس ويتوقف عند الطوابق المختلفة، *صحن يستند إلى طاولة؟

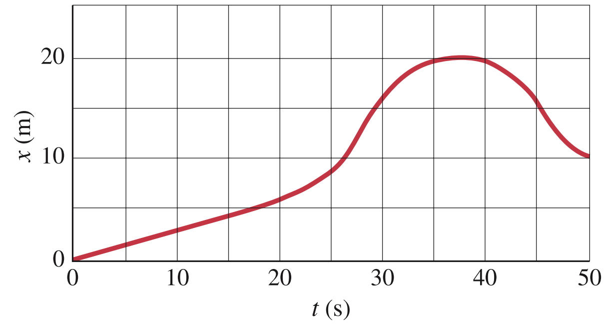
18. الجسم الذي يقذف عموديًا إلى الأعلى يعود إلى موضعه الأصلي بمقدار السرعة نفسها التي انطلق بها في حال كانت مقاومة الهواء مهملة. إذا لم تهمل مقاومة الهواء، فهل تتغير هذه النتيجة، إذا كانت الحل نعم، فكيف؟ [تلميح: التسارع الناجم عن مقاومة الهواء يكون اتجاهه دائمًا معاكساً لحركة الجسم].

19. هل يمكن لجسم أن تكون سرعته صفرًا، وفي ذات الوقت لا يساوي تسارعه صفرًا؟ أعط أمثلة.

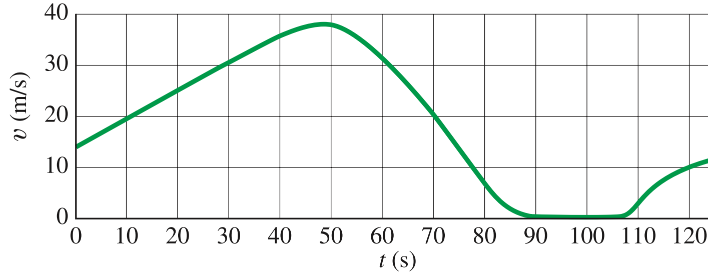
20. هل يمكن لجسم أن يكون تسارعه صفراً، وفي ذات الوقت لا تساوي سرعته صفرًا؟ أعط أمثلة.

* **21.** صف بالكلمات الحركة المرسومة في (الشكل 2 - 28) بدلالة a,v وهكذا .
[تلميح: بداية، حاول محاكاة الحركة المرسومة بأن تمشي أو تحرك يدك.]

* **22.** صف بالكلمات حركة الجسم المرسومة في (الشكل 2 - 29).



الشكل 2-28 السؤال 21 والمسائل 50 و 51 و 55.



الشكل 2-29 سؤال 22 والمسائل 49 و 54.

مسائــل

[المسائل في نهاية كل فصل مصنفة I, II أو III تبعًا للصعوبة التقديرية، (I) أسهل المسائل. المستوى III هي مسائل لتحدي أفضل الطلاب. المسائل مرتبة حسب البنود، وهذا يعني أن القارىء يجب أن يكون قد قرأ المادّة كلها متضمّنة ذلك البند، وقد تعتمد المسائل على مادة سابقة. أخيرًا، هناك مسائل غير مصنفة - مسائل عامة — ليست مرتبة حسب رقم البند.]

2-1 إلى 2-3 السرعة والسرعة المتجهة.

1. (I) ماذا يجب أن يكون متوسط سرعة سيارتك لكي تسافر 235 km في 3.25 h؟

2. (I) يمكن أن يطير عصفور بسرعة 25 km/h. ما الزمن اللازم لكي يقطع مسافة 15 km؟

3. (I) إذا كنت تسير بسرعة 110 km/h على طريق مستقيم، ونظرت إلى جانب الطريق مدة 2.0 s، فما المسافة التي قطعتها خلال مدّة عدم الانتباه هذه؟

4. (I) حول سرعة 35mi/h إلى: (أ) km/h (ب) m/s (ج) ft/s .

5. (I) كرة تتدحرج ، تتحرك من $x_1 = 3.4\ \text{cm}$ إلى $x_2 = -4.2\ \text{cm}$ خلال المدّة من $t_1 = 3.0\ \text{s}$ إلى $t_2 = 6.1\ \text{s}$. ما متوسط سرعتها المتجهة؟

6. (II) عند اللحظة $t_1 = -2.0\ \text{s}$ يقع جسيم ما عند $x_1 = 3.4\ \text{cm}$، وعند اللحظة $t_2 = 4.5\ \text{s}$ يكون موضعه $x_2 = 8.5\ \text{cm}$. ما متوسط سرعته المتجهة؟ هل يمكنك حساب متوسط سرعته من هذه البيانات؟

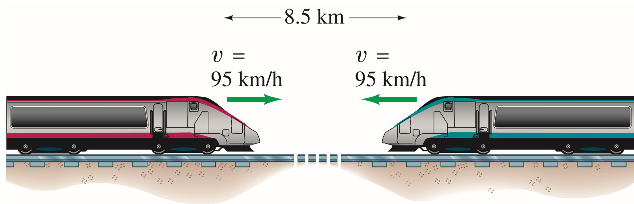
7. (II) تسير بسيارتك من المدرسة إلى البيت بسرعة ثابتة 95 km/h مسافة 130 km. وعندما بدأت السماء تمطر، أبطأت السرعة إلى 65 km/h، فوصلت إلى البيت بعد سفر استغرق 3 ساعات و 20 min. (أ) ما المسافة بين بيتك والمدرسة؟ (ب) كم كان متوسط سرعتك؟

8. (II) تبعا لقاعدة متبعة، كل خمس ثوانٍ بين رؤية البرق وسماع الرعد تكافئ ميلا واحدا عن مكان البرق. بفرض أن الضوء لا يستغرق وقتا للوصول، احسب بالتقريب سرعة الرعد (m/s) من هذه القاعدة.

9. (II) دار شخص ثماني دورات حول مر طوله ربع ميل في زمن كلي مقداره 12.5 min. احسب: (أ) متوسّط سرعته. (ب) متوسّط سرعته المتجهة، بـ m/s .

10. (II) هرب حصان من مدربه في خط مستقيم فقطع مسافة 116 m في 14.0 s. ثم استدار فجأة ليقطع نصف المسافة في 4.8 s. احسب: (أ) متوسّط سرعته. (ب) متوسّط سرعته المتجهة للمسافة كلها، باعتبار البعد عن المدرب هو الاتجاه الموجب.

11. (II) تقترب قاطرتان كل منهما من الأخرى على خطين متوازيين. كل منهما سرعتها 95 km/h بالنسبة إلى الأرض. إذا كان البعد بينهما ابتداءً 8.5 km، فما الزمن اللازم لهما كي تتقابلا؟ (انظر الشكل 2-30)



الشكل 2 - 30 المسألة 11.

12. (II) سيارة سرعتها 88 km/h على بعد 110 m خلف شاحنة سرعتها 75 km/h. كم يلزم من الوقت حتى تلحق السيارة بالشاحنة؟

13. (II) طائرة سارت 3100 km بسرعة 790 km/h، وبعد ذلك هبت رياح من الخلف جعلت سرعتها 990 km/h لتسير مسافة 2800 km. كم الزمن الكلي للرحلة؟ كم متوسط سرعة الطائرة خلال هذه الرحلة؟
[تلميح: فكر مليًا قبل استعمال المعادلة 2-11د]

14. (II) احسب متوسّط السرعة ومتوسّط السرعة المتجهة لرحلة ذهاب وعودة: حيث الذهاب 250 km تمت بسرعة 95 km/h تبعها استراحة مدّتها ساعة للغداء، ثم 250 km عودة بسرعة 55 km/h.

15. (III) كرة (بولينج) تسير بسرعة ثابتة لتصطدم بأوتاد عند نهاية المسار الذي يبعد 16.5 m. يسمع اللاعب صوت ارتطام الكرة بعد 2.50 s من انطلاقها من بين يديه. ما سرعة الكرة؟ سرعة الصوت في الهواء 340 m/s .

2-4 التسارع

16. (I) سيارة سباق تسارعت من السكون إلى 95 km/h في 6.2 s ما متوسط تسارعها بـ m/s^2 ؟

17. (I) عداءة تسارعت من السكون إلى سرعة 10.0 m/s في 1.35 s. كم كان تسارعها: (أ) بـ m/s^2 ؟ (ب) بـ km/h^2 ؟

18. (II) على خط السير السريع، تستطيع سيارة التسارع بحوالي $1.6\ m/s^2$. بهذا المعدل، كم تستغرق من الوقت لتتسارع من 80 km/h إلى 110 km/h؟

19. (II) سيارة رياضية تسير بسرعة ثابتة لتقطع 110 m في 5.0 s. إذا استعملت الكوابح لتتوقف خلال 4.0 s فما تسارعها بـ m/s^2؟ عبّر عن الحل بدلالة "g" حيث $1.00\ g = 9.80\ m/s^2$.

20. (III) يعطى موقع سيارة سباق، تبدأ من السكون عند $t=0$ وبخط مستقيم، كدالة مع الزمن بالقائمة التالية. احسب بالتقريب: (أ) سرعتها المتجهة. (ب) تسارعها كدالة في الزمن. اعرض ذلك في قائمة، ومن ثَمَّ في رسم بياني.

t (s)	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50
x (m)	0	0.11	0.46	1.06	1.94	4.62	8.55	13.79

t (s)	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
x (m)	20.36	28.31	37.65	48.37	60.30	73.26	87.16

2-5 و 2-6 الحركة بتسارع ثابت

21. (I) تتسارع سيارة من 13 m/s إلى 25 m/s في 6.0 s. ماذا كان تسارعها؟ ما المسافة التي قطعتها في هذا الزمن؟ بفرض أن التسارع ثابت.

22. (I) تتباطأ سيارة من 23 m/s إلى السكون بعد أن تقطع مسافة 85 m. ماذا كان تسارعها، بفرض أنه ثابت؟

23. (I) على طائرة خفيفة الوصول إلى سرعة 33 m/s للإقلاع. ما طول المدرج المطلوب إذا كان تسارعها الثابت $3.0\ m/s^2$؟

24. (II) عداءة عالمية تستطيع الوصول إلى سرعة قصوى (حوالي 11.5 m/s) في الـ 15.0 m الأولى. ما متوسط تسارعها؟ وكم يلزمها من الزمن للوصول إلى هذه السرعة؟

25. (II) تتباطأ سيارة بانتظام من سرعة 21.0 m/s إلى السكون في 6.00 s، ما المسافة التي تقطعها في هذا الزمن؟

26. (II) في أثناء الوصول إلى الوقوف التام، تترك السيارة آثار انزلاق طولها 92 m على الطريق. بفرض تباطؤ $7.00\ m/s^2$، احسب سرعة السيارة قبل استعمال الكوابح؟

27. (II) تسير سيارة بسرعة 85 km/h تصطدم بشجرة. تنضغط مقدمة السيارة ويصل السائق للسكون في مسافة 0.80 m. ماذا كان متوسط التسارع للسائق في أثناء التصادم؟ عبّر عن الحل بدلالة "g" حيث $1.00\ g = 9.80\ m/s^2$.

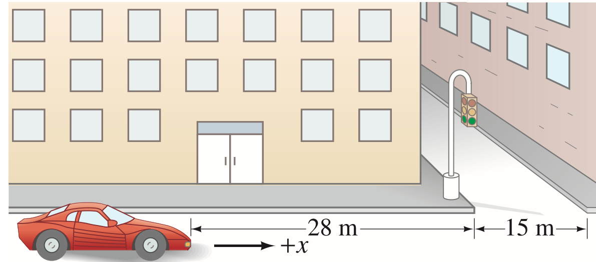
28. (II) احسب مسافات التوقف لسيارة تسير بسرعة ابتدائية 95 km/h، وزمن رد الفعل للسائق 1.0 s إذا كان التسارع (أ) $a = -4.0\ m/s^2$ (ب) $a = -8.0\ m/s^2$

29. (III) بيّن أن مسافة التوقف للسيارة هي $d_S = v_0 t_R - v_0^2/(2a)$ حيث v_0 هي السرعة الابتدائية للسيارة، t_R زمن رد الفعل للسائق و a هو التسارع الثابت (سالب).

30. (III) سيارة تسير خلف شاحنة سرعتها 25 m/s على الطريق السريع. يتطلع سائق السيارة إلى فرصة كي يتجاوز الشاحنة، لذا يخمّن أن سيارته تتسارع بـ $1.0\ m/s^2$. وعليه أن يقطع طول الشاحنة 20-m و 10 m إضافية أمام الشاحنة، و في المقابل هناك سيارة قادمة سرعتها 25 m/s كذلك وعلى بعد حوالي 400 m. هل يمكنه أن يجرب التجاوز؟ أعطِ تفاصيل.

31. (III) يأمل عداء في أن يقطع مسافة 10,000 m في أقل من 30.0 min. بعد زمن 27.0 min كان هناك 1100 m باقية ليقطعها. وعلى العداء أن يتسارع بـ $0.20\ m/s^2$، فما الزمن اللازم لتحقيق الهدف؟

32. (III) تقود سائقة سيارتها بسرعة 45 km/h تقترب من تقاطع طريق عندما تعطي الإشارة الضوء الأصفر. تعرف أن الضوء الأصفر يستغرق ثانيتين قبل التحول إلى الضوء الأحمر. تبعد السائقة 28 m من بداية التقاطع (الشكل 2 - 31). هل عليها التوقف أو محاولة تجاوز هذا التقاطع قبل أن تتحول الإشارة إلى الأحمر؟ عرض التقاطع 15 m. أقصى تباطؤ لسيارتها يساوي $-5.8\ m/s^2$ في حين تستطيع أن تتسارع من 45 km/h إلى 65 km/h في 6.0 s. أهمل طول السيارة وزمن رد فعل السائقة.



الشكل **2-31** المسألة 32.

2-7 الأجسام الساقطة (أهمل مقاومة الهواء)

33. (I) يسقط حجر من أعلى جرف. إذا كان الحجر يصطدم بالأرض بعد 3.25 s. فما ارتفاع الجرف؟

34. (I) إذا انزلقت سيارة من ($v_0 = 0$) من أعلى جرف عموديًا، فما الزمن اللازم كي تصل سرعتها إلى 85 km/h؟

35. (I) قدّر: (أ) كم الزمن الذي لزم كنج كونغ للسقوط رأسيًا من أعلى بناية "إمْبَيَرْ ستيت" (ارتفاعها 380 m). (ب) سرعته قبيل أن "يصل" إلى الأرض؟

36. (III) قذفت كرة بيسبول إلى الأعلى بسرعة 22 m/s: (أ) إلى أي ارتفاع سوف تصل؟ (ب) ما زمن بقائها في الهواء؟

37. (II) يمسك لاعب الكرة بعد 3.0 s من قذفها نحو الأعلى. بأي سرعة قذفها، وإلى أي ارتفاع وصلت؟

38. (II) جسم يبدأ من السكون ويسقط تحت تأثير الجاذبية. ارسم بيانيًا: (أ) سرعته. (ب) المسافة التي يسقطها من $t=0$ إلى $t = 5.00$ s. أهمل مقاومة الهواء.

39. (III) طائرة عمودية(هيليوكوبتر) ترتفع إلى الأعلى بسرعة 5.20 m/s وعند ارتفاع 125 m فوق الأرض ألقيت منها رِزْمةٌ من الشباك. ما الزمن اللازم للرزمة كي تصل إلى الأرض؟ [تلميح: السرعة الابتدائية للرزمة تساوي سرعة الطائرة].

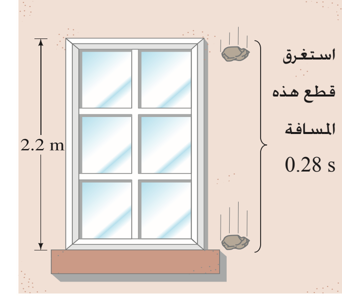
40. (II) بالنسبة للجسم الذي يسقط سقوطًا حرًا، بيّن أن المسافات المقطوعة كل ثانية لاحقة تزداد بنسبة الأرقام الصحيحة الفردية بالتتابع (1,3,5,...). كان غاليليو أول من أثبت ذلك. انظر (الشكل 2- 18 و 2-21).

41. (II) أهمل مقاومة الهواء، بين (جبريًا) أن كرة تقذف رأسيًا إلى الأعلى بسرعة v_0 سوف يكون لها السرعة نفسها عند عودتها إلى نقطة البداية.

42. (II) قذف حجر رأسيًا بسرعة 18.0 m/s: (أ) كم سرعته عندما يصل إلى ارتفاع 11.0 m؟ (ب) ما الزمن اللازم له كي يصل إلى هذا الارتفاع؟ (ج) لِمَ هناك جوابان لفرع ب؟

43. (III) احسب بالتقريب الزمن بين كل صورتين متتاليتين للتفاحة في (الشكل 2-18). افرض أن قطر التفاحة حوالي 10 cm. [تلميح: استعمل موقعين متتاليين للتفاحة، لكن ليس من المواقع غير الواضحة التي في الأعلى].

44. (III) يستغرق حجر ساقط $0.28\ s$ ليقطع نافذة طولها $2.2\ m$ (الشكل 2-32). من على أي ارتفاع فوق الحافة العلوية للنافذة يبدأ الحجر بالسقوط؟



الشكل **2-32**
المسألة 44.

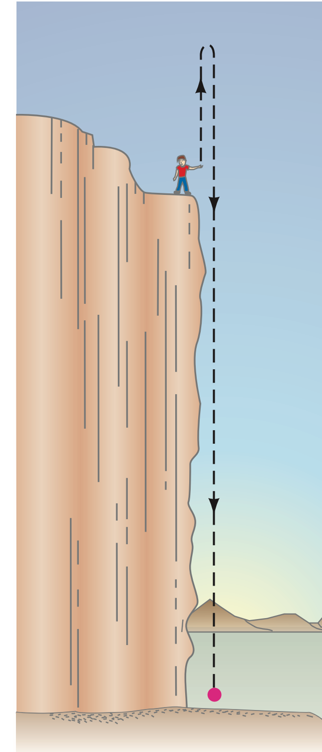
45. (III) أُسقط حجر من أعلى جرف بحري، وسُمع صوت ارتطامه بالماء بعد $3.2\ s$. فإذا كانت سرعة الصوت في الهواء $340\ m/s$، فما ارتفاع الجرف؟

46. (III) افرض أنك ضبطت فتحة خرطوم المياه في حديقتك على تيار شديد من الماء. ووجهت فتحة الخرطوم إلى الأعلى وعلى ارتفاع $1.5\ m$ من سطح الأرض (الشكل 2-33). عندما تبعد الخرطوم سريعًا عن المستوى العمودي، تسمع الماء يرتطم بالأرض بعد $2.0\ s$. ما سرعة الماء عندما ينطلق من فتحة الخرطوم؟



الشكل **2-33** المسألة 46.

47. (III) قذف حجر إلى الأعلى رأسيًا بسرعة $12.0\ m/s$ من على حافة جرف ارتفاعه $70.0\ m$ (الشكل 2-34). (أ) كم الزمن اللازم له ليصل إلى أسفل الجرف؟ (ب) ما سرعته قبيل اصطدامه بالأرض؟ (ج) ما المسافة الكلية التي يقطعها؟



الشكل **2-34**
المسألة 47

48. (III) شوهدت كرة بيسبول تمر نحو الأعلى من أمام نافذة ترتفع عن الشارع $28\ m$ بسرعة رأسية $13\ m/s$. إذا كانت الكرة قذفت من الشارع: (أ) كم كانت سرعتها الابتدائية؟ (ب) ما الارتفاع الذي ستصل إليه؟ (ج) متى قذفت؟ (د) متى تعود إلى الشارع مرة أخرى؟

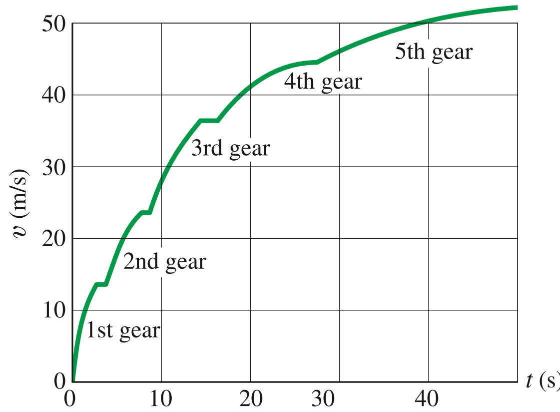
* 2-8 تحليل بياني

* **49.** (I) يبين (الشكل 2-29) سرعة قطار بدلالة الزمن. (أ) عند أي زمن كانت سرعته أقصى ما يمكن؟ (ب) خلال أيّ مُدَدٍ زمنية، إذا وجدت، كانت السرعة ثابتة؟ (ج) خلال أيّ مُدَدٍ، إذا وجدت، كان التسارع ثابتًا؟ (د) متى كان مقدار التسارع أكبر ما يمكن؟

* **50.** (II) موقع أرنب داخل نفق مستقيم بدلالة الزمن، مرسوم في (الشكل 2-28). كم سرعته اللحظية: (أ) عند $t = 10.0\,s$؟ (ب) عند $t = 30.0\ s$؟ ما متوسط سرعته المتجهة؟ (ج) بين $t = 0$ و $t = 5.0\,s$؟ (د) بين $t = 25.0\,s$ و $t = 30.0\,s$؟ (هـ) بين $t = 40.0\ s$ و $t = 50.0\ s$؟

* **51.** (II) في (الشكل 2-28 أ) خلال أيّ مُدَدٍ زمنية، إذا وجدت، تكون السرعة المتجهة ثابتة؟ (ب) عند أي زمن تكون السرعة المتجهة قصوى؟ (ج) عند أي زمن، إذا وُجِد، تكون السرعة المتجهة صفرًا؟ (د) هل يتحرك الجسم في اتجاه واحد أم في اتجاهين خلال الزمن المبيّن؟

* **52.** (II) نوع معيّن من السيارات يستطيع أن يتسارع كما هو مبيّن في منحنى السرعة – الزمن في (الشكل 2-35) (المواقع المستقيمة القصيرة تدل على نقل الحركة). (أ) احسب بالتقريب متوسّط التسارع خلال مُدَّتي النقل الثانية والرابعة. (ب) احسب بالتقريب المسافة التي سارتها السيارة خلال النقلة الرابعة.

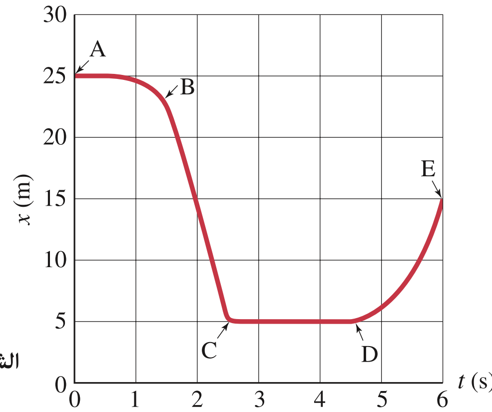


الشكل **2-35** المسألتان 52 و 53. سرعة سيارة بدلالة الزمن، تبدأ من السكون. القفزات في المنحنى تدل على غيارات ناقل الحركة.

* **53.** (II) احسب متوسط التسارع للسيارة في المسألة السابقة (الشكل 2-35) عندما يكون الغيار: (أ) الأول. (ب) الثالث. (ج) الخامس. ما متوسط التسارع في الغيارات الأربعة الأولى؟

* **54.** (II) في الشكل 2 - 29، احسب بالتقريب المسافة المقطوعة خلال الدقيقة (أ) الأولى (ب) الثانية.

* **55.** (II) ارسم العلاقة بين v و t للجسم الذي إزاحته كدالة في الزمن معروضة في الشكل 2-28.

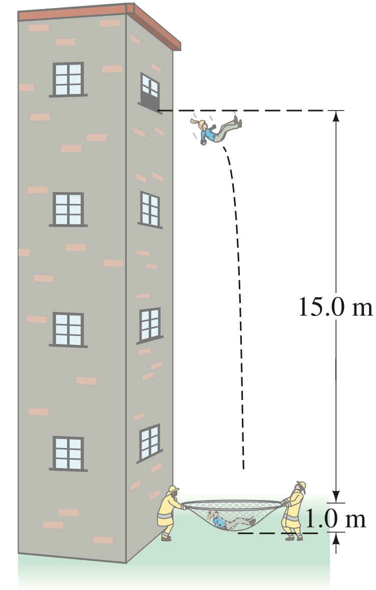


الشكل 2 - 36 المسألة 56

* 56. (II) يبين (الشكل 2-36) رسماً بيانياً بين الموقع والزمن لحركة جسم على محور x. اعتبر المدّة من A إلى B. (أ) هل يتحرك الجسم بالاتجاه الموجب أم بالاتجاه السالب؟ (ب) هل يتسارع الجسم أم يتباطأ؟ (ج) هل تسارع الجسم موجب أم سالب؟ اعتبر الآن المدّة من نقطة D إلى نقطة E. (د) هل يتحرك الجسم بالاتجاه الموجب أم بالاتجاه السالب؟ (هـ) هل تزداد سرعة الجسم أم تقل؟ (و) هل تسارع الجسم موجب أم سالب؟ (g) أخيرًا، أجب عن هذه الأسئلة الثلاثة في المدّة الزمنية من C إلى D.

مسائل عامة

57. تقفز فتاة من نافذه في الطابق الرابع ارتفاعها 15.0 m فوق شبكة السلامة لرجال الإطفاء. تمط الشبكة 1.0 m قبل أن تصل إلى السكون، (الشكل 37 - 7) (أ) كم كان متوسط التسارع للفتاة في أثناء تباطئها نحو السكون بواسطة الشبكة؟ (ب) ماذا يمكنك أن تعمل لجعلها أكثر سلامة (أي لتقلل تسارعها)، هل تشدّ الشبكة أم ترتخيها؟ فسِّر ذلك.

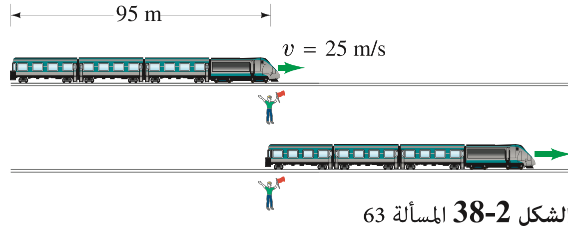


الشكل 2-37 المسألة 57.

61. شركة صناعة سيارات تختبر سياراتها للتصادمات الأمامية والخلفية: حيث ترفع السيارة عاليا برافعة ثم تلقى من ارتفاع معين. (أ) بيّن أن السرعة قبيل ارتطامها بالأرض من على ارتفاع H هي $\sqrt{2gH}$. ما الارتفاع اللازم الذي تسقط منه السيارة حتى تكون سرعتها قبيل ارتطامها بالأرض؟ (ب) 60 km/h (ج) 100 km/h؟

62. تتحرك الأرض كل سنة 10^9 km في أثناء دورانها حول الشمس. ما متوسط سرعة الأرض بـ km/h ؟

63. قطار طوله 95-m يبدأ بالتسارع من السكون. سرعة مقدمة القطار هي 25 m/s عند مروره أمام عامل سكة الحديد، الذي يقف على بعد 180 m من نقطة انطلاق مقدمة القطار. كم ستكون سرعة آخر عربة من القطار عند مرورها أمام العامل؟ (انظر الشكل 2-38).



الشكل 2-38 المسألة 63

58. تسارع الجاذبية على القمر يساوي تقريبًا سُدس قيمته على الأرض. إذا قذف جسم رأسيًا على القمر، فكم مرة أعلى سوف يصل الحجر من ارتفاعه على الأرض، بفرض أن السرعة الابتدائية نفسها؟

59. الشخص المثبت جيدًا بحزام الأمان لديه فرصة كبيرة للنجاه من حادث سيارة إذا لم يزد التباطؤ على 30 g حيث ($1.0\ g = 9.8\ m/s^2$). افرض تباطؤاً منتظماً بهذه القيمة، احسب المسافة التي تصمم الواجهة الأمامية لتتحطم خلالها إذا أدى التصادم إلى توقف السيارة من السرعة 100 km/h.

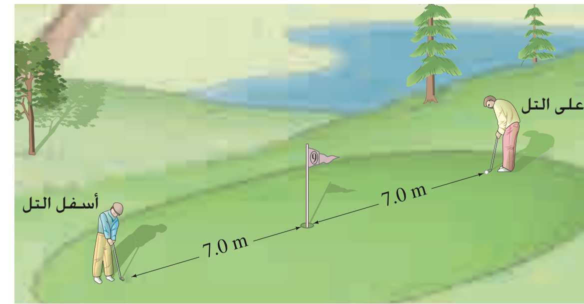
60. يقف العميل بوند على جسر يرتفع 12 m عن الطريق: حيث يقترب منه مَن يطاردونه. لاحظ أن هناك شاحنة تقترب منه بسرعة 25 m/s حيث قاس ذلك من خلال معرفته أن المسافة بين أعمدة الهاتف في ذلك البلد هي 25 m حيث تمر الشاحنة قربها. الشاحنة ترتفع عن الأرض 1.5 m. وقد حسب بوند عدد الأعمدة التي يجب أن تبعدها الشاحنة بحيث يقفز فوقها من الجسر ليهرب. كم عدد هذه الأعمدة؟

64. يقفز شخص من على منصه الغوص التي ترتفع 4.0 m فوق سطح الماء، في بركة عميقة. توقفت حركة الشخص على عمق 2.0 m من سطح الماء. احسب بالتقريب متوسط التسارع للشخص تحت الماء.

65. في تصميم نظام نقل سريع، من الضروري الموازنة بين متوسط سرعة القطار والمسافات بين نقاط الوقوف. كلما زاد عدد مرات الوقوف قلَّ متوسط السرعة للقطار. وللحصول على فكرة عن هذه المسألة، احسب الزمن اللازم للقطار لقطع مسافة 9.0-km في حالتين: (أ) المحطات التي يجب على القطار أن يتوقف فيها تبعد 1.8 km عن بعضها. (مجموع 6 محطات بما في ذلك محطة البداية ومحطة النهاية) (ب) المحطات تبعد 3.0 km (أربع محطات كلية). افرض أن القطار يتسارع بـ $1.1\ m/s^2$ عند كل محطة حتى يصل إلى 90 km/h ثم يبقى على هذه السرعة حتى تعمل المكابح للوصول إلى المحطة التالية حيث يتباطأ بـ $-2\ m/s^2$. افرض أنه يتوقف عند كل محطة بينية لمدة 20 s.

66. يثني البجع جناحيه ويسقط سقوطاً حراً نحو الأسفل عند صيد الأسماك. افرض أن بجعة بدأت الغوص من على ارتفاع 16.0 m ولا تستطيع تغيير مسارها حالما بدأته. إذا كانت السمكة تحتاج إلى 0.20 s للمراوغة، فما أقل ارتفاع يجب على السمكة أن ترصد فيه البجعة كي تستطيع النجاة؟ افرض أن السمكة عند سطح الماء.

67. في لعبة الغولف، يضرب اللاعب الكرة بقوة تكفي لوضع الكرة على بعد صغير من الحفرة، مثلا 1.0 m أو أقل، في حال لم تسقط فيها. إن تحقيق ذلك يكون صعباً عند ضرب الكرة من نقطة في أعلى المرتفع مقارنة مع ضربها من نقطة في أسفل المرتفع (انظر الشكل 2 - 39). لمعرفة السبب، افرض أنّ كرة على أحد المسطحات الخضراء تتباطأ بمعدل ثابت $2.0\ m/s^2$ نحو الأسفل وبمعدل $3.0\ m/s^2$ نحو الأعلى. افرض أننا عند مرتفع وعلى بعد 7.0 m من الحفرة. احسب مدى السرعة الابتدائية الذي قد تمنحه للكرة بحيث تتوقف في مدى 1.0 m أقرب أو أبعد من الحفرة. اجرِ الحساب نفسه في حال كنا عند نقطة في منخفض وعلى بعد 7.0 m من الحفرة. ما الذي تراه في نتائجك يدل على أن ضرب الكرة نحو الأسفل أصعب؟



الشكل 2 - 39 المسألة 67، لعب الغولف صباح الأربعاء.

68. شخص هارب يحاول القفز إلى قطار شحن يسير بسرعة 6.0 m/s. في اللحظة التي عبرت سيارة صغيرة، بدأ الشخص بالتسارع $a = 4.0\ m/s^2$ إلى سرعته القصوى 8.0 m/s. (أ) ما الزمن اللازم له ليحلق السيارة الصغيرة. (ب) ما المسافة التي يقطعها للوصول إلى السيارة؟

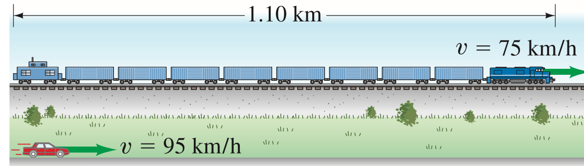
69. ألقي حجر من على سطح بناية عالية. وألقي حجر ثان بعد 1.50 s. ما المسافة بين الحجرين عندما تصل سرعة الثاني إلى 12.0 m/s؟

70. على سائق سباق أن يسجل متوسط سرعة 200.0 km/h خلال الزمن الذي يحتاج إليه لإتمام عشر دورات. إذا أتم أول تسع دورات بسرعة 198.0 km/h. فما متوسط السرعة للدورة الأخيرة؟

71. سائق دراجة في سباق الدراجات الفرنسي يبلغ ذروة ممر جبلي عندما يتحرك بسرعة 18 km/h. عند القاعدة، حيث يبعد 4.0 km تكون سرعته 75 km/h، ماذا كان متوسط تسارعه (بـ m/s^2) في أثناء نزوله عن الجبل؟

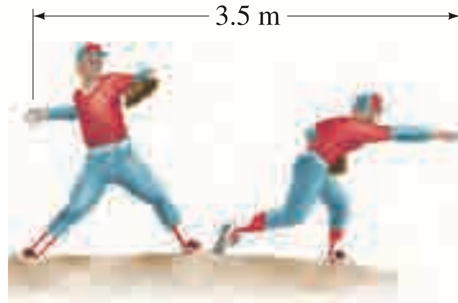
72. يلعب طفلان ألعاباً بهلوانية (الترامبولين). يستطيع أحد الطفلين الارتداد نحو الأعلى مرة ونصف أكثر من الطفل الثاني. السرعة الابتدائية للطفل الثاني هي 5.0 m/s. (أ) احسب أقصى ارتفاع يصل إليه الطفل الثاني. (ب) ما السرعة الابتدائية للطفل الأول؟ (ج) ما الزمن الذي يقضيه الطفل الأول في الهواء؟

73. سيارة تسير بسرعة 95 km/h تتجاوز قطاراً طوله 1.10-km يسير بالاتجاه نفسه على سكّة موازية للطريق. إذا كانت سرعة القطار 75 km/h، فما الزمن اللازم للسيارة كي تتجاوز القطار، وما المسافة التي تكون السيارة قد قطعتها خلال التجاوز؟ انظر (الشكل 2 - 40). ماذا ستكون النتائج لو أن السيارة والقطار يسيران باتجاهين متعاكسين؟



الشكل 2 - 40 المسألة 73.

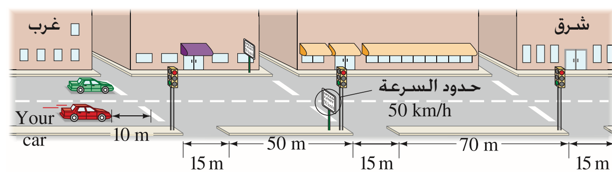
74. يقذف لاعب بيسبول الكرة بسرعة 44 m/s. عند رمي الكرة، يسارع اللاعب تلك الكرة في مسافة 3.5 m من خلف جسمه إلى نقطة انطلاقها (الشكل 2 - 41). احسب متوسط التسارع للكرة خلال عملية الرمي.



الشكل 2 - 41 المسألة 74.

75. يرتفع صاروخ من السكون بتسارع $3.2\ m/s^2$ حتى يفرغ من الوقود عند ارتفاع 1200 m. بعد هذه النقطة يصبح تسارعُه تسارعَ الجاذبيةِ نحو الأسفل. (أ) ما مقدار سرعة الصاروخ عندما يفرغ من الوقود؟ (ب) ما الزمن اللازم لبلوغ هذه النقطة؟ (ج) ما أقصى ارتفاع يصل إليه الصاروخ؟ (د) ما الزمن اللازم (الكلي) كي يصل إلى أقصى ارتفاع؟ (هـ) بأي سرعة يصطدم الصاروخ بالأرض؟ (و) ما الزمن الكلي الذي يقضيه الصاروخ في الهواء؟

76. اعتبر رسم الشارع المبيّن في (الشكل 2 - 42). كل تقاطع عنده إشارة ضوئية، وحد السرعة 50 km/h. افرض أنك تقود سيارتك من الغرب بالسرعة المحددة. عندما تكون على بعد 10 m من التقاطع الأول، كل الإشارات تعطي الضوء الأخضر وتبقى كذلك لمدة 13 s. (أ) احسب الزمن اللازم للوصول إلى الإشارة الضوئية الثالثة. هل يمكنك تحقيق ذلك في أثناء إضاءة الإشارات كلها دون توقف؟ (ب) سيارة أخرى توقفت عند الإشارة الضوئية الأولى عندما تحولت الإشارات إلى الضوء الأخضر، تستطيع أن تتسارع بمعدل $2.0\ m/s^2$ حتى السرعة الحدية. هل تستطيع السيارة الثانية أن تعبر الإشارات الثلاث من غير توقف؟



الشكل 2 - 42 المسألة 76

.77 تبدأ سيارة شرطة من السكون بمطاردة شاحنة لسائق يتجاوز السرعة؛ حيث يسير بسرعة 120 km/h. يلحق ضابط الشرطة السائق في مسافة 750 m عندما كان الضابط يسير بتسارع ثابت. ارسم بطريقة وصفية موقع كل من السيارتين مع الزمن من نقطة انطلاق سيارة الشرطة حتى نقطة اللحاق بالسائق المتهور. واحسب: (أ) الزمن الذي لزم الضابط للحاق بالسائق (ب) تسارع سيارة الشرطة (ج) سرعة سيارة الشرطة عند لحظة الوصول إلى السائق.

.78 ألقي حجر من سطح بناية، وبعد ثانيتين قذف حجر آخر إلى الأسفل بسرعة ابتدائية 25.0 m/s وقد وصل الحجران إلى الأرض في اللحظة نفسها. (أ) ما الزمن اللازم للحجر الأول كي يصل إلى الأرض؟ (ب) ما ارتفاع المبنى؟ (ج) ما سرعة كل من الحجرين قبيل ارتطامهما بالأرض؟

.79 قُذف حجران رأسيًا إلى الأعلى في اللحظة نفسها. إذا قذف الحجر الأول بسرعة 11.0 m/s من شرفة الدور 12 لبناية ليصل إلى الأرض بعد 4.5 s. فما السرعة الابتدائية التي يجب أن يُقذف بها الحجر الثاني من شرفة الدور الرابع للبناية كي يصل الحجران إلى الأرض في الوقت نفسه؟ اعمل فرضيات بسيطة مثل تساوي ارتفاع الأدوار.

.80 إذا أهملنا مقاومة الهواء، ما الزمن اللازم لمظلة تسقط من طائرة على ارتفاع 3200 m لتصل إلى ارتفاع 350 m، الذي يسحب عنده حبل فتح المظلة ؟ ماذا ستكون سرعتها عند هذا الارتفاع؟ (في الواقع، إنّ مقاومة الهواء سوف تحدد سرعتها بحوالي 150 km/h).

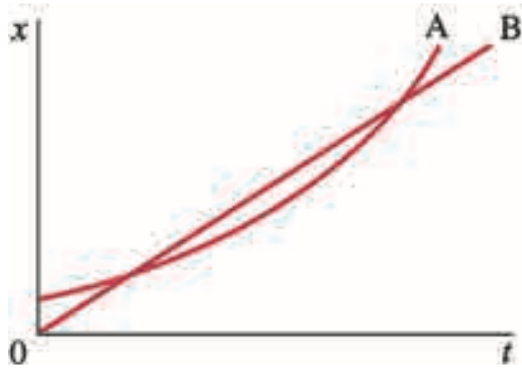
.81 مطعم وجبات سريعة يستخدم حزامًا ناقلاً لإدخال البيرغر عبر آلة شواء. إذا كان طول هذه الآلة 1.1 m ويحتاج البيرغر إلى 2.5 min لينضج، فما سرعة حركة الحزام الناقل؟ إذا كان البعد بين كل قطعتين 15 cm، فما معدل إنتاج البيرغر (بـ قطعة/ دقيقة).

.82 يستطيع (بيل) قذف كرة إلى الأعلى بسرعة أكبر من سرعة (جو) بمرة ونصف. كم مرة أكبر يكون ارتفاع كرة بيل من ارتفاع كرة جو؟

.83 إذا كنت تقف أعلى جرف، في حين يقف صاحبك على الأرض أسفل منك. قمت بإسقاط كرة من السكون فاستغرقت 1.2 s لتصل إلى الأرض. يلتقط صاحبك الكرة ويقذفها رأسيًا إلى الأعلى لتصل إليك في اللحظة التي تصل فيها إلى السكون. ما السرعة التي يطلق فيها صاحبك الكرة؟

.84 طُلب إلى طالبين قياس ارتفاع بناية باستخدام باروميتر. وبدل أن يستعمل الطالبان الباروميتر لقياس الارتفاع، أسقطاه من سطح البناية وقاسا الزمن اللازم لوصوله إلى الأرض. سجّل أحد الطالبين زمن 2.0 s، في حين سجّل الثاني 2.3 s. ما مقدار الفرق في ارتفاع البناية الذي ينجم عن فرق الزمن 0.3 s؟

* **.85** يبيّن الشكل 2-43 الموقع كدالة مع الزمن لدراجتين A , B (أ) هل هناك لحظة يكون فيها للدراجتين السرعة النهائية نفسها؟ (ب) أيّ الدراجتين لها تسارع أكبر؟ (ج) في أي لحظة أو لحظات تتجاوز الدراجتان إحداهما الأخرى؟ أيّ الدراجتين تتجاوز الأخرى؟ (د) أيّ الدراجتين لها سرعة لحظية أكبر؟ (ج) أيّ الدراجتين لها متوسط سرعة أكبر؟



الشكل **2 - 43** المسألة 85

إجابات التمارين

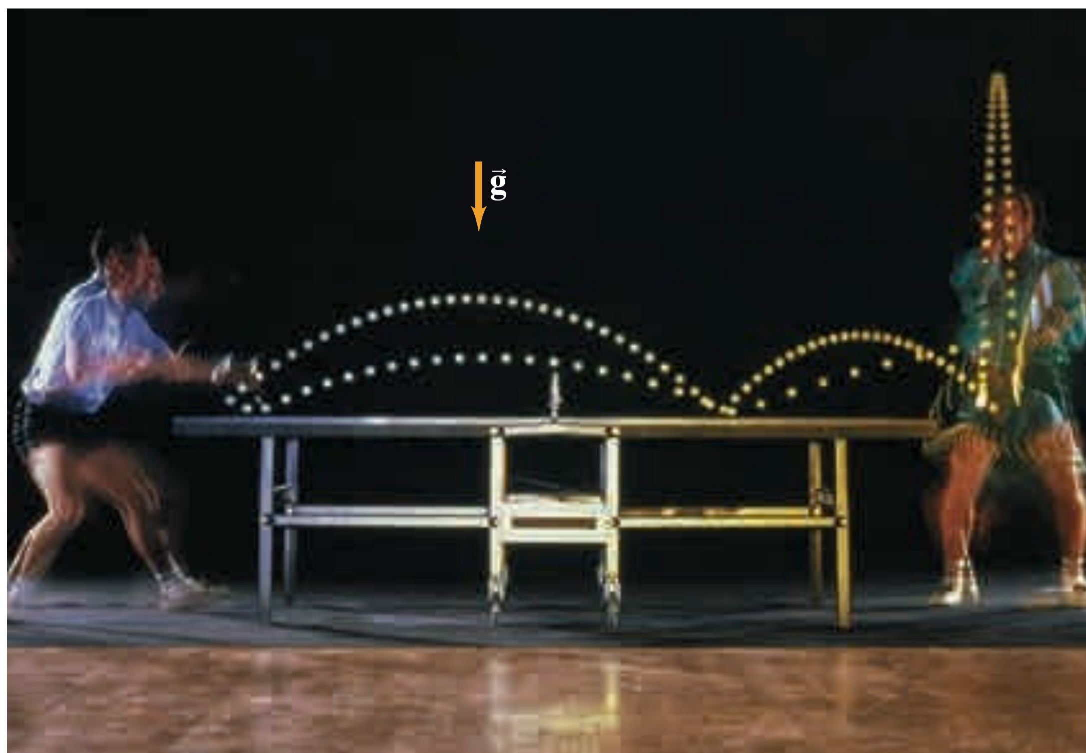
أ: (ب)

ب: (أ)+ ، (ب) – ، (جـ) +، (د) –.

جـ: (جـ)

د: 4.9 m/s^2

هـ: هو السطح الذي لا تتدحرج عليه كرة ملساء، أو عمودي على الرأسي.



ترينا هذه الصورة متعددة الوميض للعبة كرة الطاولة مثالا على الحركة في بعدين. مسارات الكرة الظاهرة في التعامل مع السرعة النسبية.
الصورة عبارة عن قطوع مكافئة تمثل (حركة المقذوفات). وقد حلل جاليليو المقذوفات إلى مركباتها الأفقية والعمودية. ويمثل السهم الذهبي اتجاه تسارع الجاذبية الأرضية $\vec{g}$. سنناقش في هذا الفصل كيفية التعامل بمهارة مع المتجهات وجمعها، إضافة إلى تحليل حركة المقذوفات، ثم سنرى كيفية التعامل مع السرعة النسبية.

الفصل 3

الحركة في بعدين والمتجهات

تعاملنا في الفصل الثاني مع الحركة في خط مستقيم. والآن، سنضع وصفاً لحركة الأجسام في بعدين (أو ثلاثة أبعاد)، وسنناقش على نحو جزئي أهمية أحد أنواع هذه الحركة الذي يعرف بحركة المقذوفات، وهي الأجسام المقذوفة بزاوية إلى أعلى بالقرب من سطح الأرض، مثل كرة(القاعدة) البيسبول، أو كرة الجولف عند ضربها بالمضرب، أو كرة القدم عند ضربها بالقدم، وغيرها. وقبل أن نبدأ مناقشة الحركة في بعدين، علينا أولا أن نتعرف المتجهات، وكيفية جمعها، وإيجاد محصلتها.

3-1 الكميات المتجهة والكميات غير المتجهة

أشرنا في الفصل الثاني إلى أنّ مصطلح السرعة المتجهة لا يعود فقط إلى مدى سرعة الأجسام المتحركة، ولكنه يُعبِّر أيضا عن اتجاه هذه السرعة. **فالكمية** التي يكون لها اتجاه، بالإضافة إلى المقدار مثل السرعة، تسمى الكمية **المتجهة** (vector quantity) ومن أمثلتها الإزاحة، والقوة، والزخم (كمية التحرك). إضافة إلى ذلك، فإنّ كثيرًا من الكميات ليس لها اتجاه، مثل الكتلة، والزمن، ودرجة الحرارة، ويمكن التعبير عنها على نحو كامل برقم، إضافة إلى وحدات قياس، مثل هذه الكميات تُسمّى **الكميات القياسية** (scalar quantities).

إنّ رسم مخطط لوصف حالة فيزيائية يكون مهمًّا دائمًا، وخصوصًا عندما نتعامل مع المتجهات. وعلى المخطط تمثل كلّ كمية متجهة بسهم يشير إلى اتجاه الكمية التي يمثلها. فطول السهم يحدّد بحيث يتناسب مع مقدار الكمية المتجهة. كمثال على ذلك، انظر (الشكل 3-1)، لقد رسمت الأسهم الخضراء لتمثل سرعة السيارة في أماكن مختلفة عندما تتحرك على المسار المنحني. أما مقدار السرعة عند كلّ نقطة، فيمكن تحديده بقياس طول السهم مضروبًا في مقياس الرسم الموضّح في الصورة $(1\,\text{cm} = 90\,\text{km/h})$. وعند كتابة الكمية المتجهة، نستخدم الخط الغامق (bold) مع وضع سهم على الكمية. فمثلًا، تكتب السرعة كما يلي: $\vec{\mathbf{v}}$. وعندما نركز على مقدار الكمية المتجهة فقط، فإننا نكتبها بالخط المائل (*italic*) مثل v، وكذلك الحال بالنسبة إلى الكميات الأخرى.

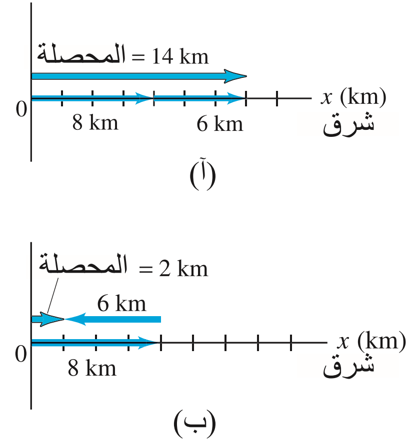


الشكل 3-1 سيارة تتحرك على طريق، تمثل فيه الأسهم الخضراء متجه السرعة عند كلّ موقع.

3-2 جمع المتجهات – طرق الرسم البياني

تجمع المتجهات بطريقة خاصة؛ لأنها تمتلك اتجاهًا ومقدارًا كذلك. سنتعامل في هذا الفصل مع متجه الإزاحة على نحو عام، وسنرمز إليه بـ $\vec{\mathbf{D}}$، كما سنرمز إلى متجه السرعة بـ $\vec{\mathbf{v}}$، وستطبق النتائج على المتجهات الأخرى التي سنواجهها لاحقًا.

عند جمع الكميات القياسية، نستخدم الجمع الجبري البسيط الذي يمكن استخدامه أيضًا في جمع المتجهات عندما تكون بالاتجاه نفسه. وعلى سبيل المثال، إذا مشى أحد الأشخاص 8 km باتجاه الشرق في يوم ما، و6 km باتجاه الشرق في اليوم التالي، فإنّ هذا الشخص يكون قد مشى من نقطة الانطلاق $8\,\text{km} + 6\,\text{km} = 14\,\text{km}$ إلى الشرق في اليومين. وهنا نقول إنّ محصلة الإزاحة هي 14 km إلى الشرق. ومن جهة أخرى، إذا مشى الشخص 8 km باتجاه الشرق في اليوم الأول، ثم مشى 6 km إلى الغرب بالاتجاه المعاكس في اليوم الثاني، فإنّ هذا الشخص يكون قد مشى 2 km إلى الشرق من نقطة انطلاقه، ومن ثَمّ تكون محصلة الإزاحة هي 2 km إلى الشرق، وفي هذه الحالة تكون محصلة الإزاحة ناتجة من الطرح $8\,\text{km} - 6\,\text{km} = 2\,\text{km}$، ولكن الجمع الجبري لا يستخدم عندما لا تكون المتجهات متوازية. فعلى سبيل المثال، لنفرض أنّ شخصًا سار 10.0 km شرقًا، ثم 5.0 km شمالًا، فإننا نستطيع تمثيل هذه الإزاحات بالرسم؛ حيث يشير محور الصادات الموجب (*positive y-axis*) إلى اتجاه الشمال، ومحور السينات الموجب (*positive x-axis*) إلى اتجاه الشرق.

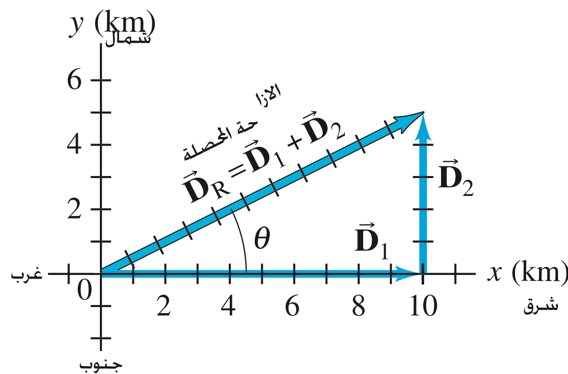


الشكل 3-2 جمع متجهين لهما الاتجاه نفسه

في (الشكل3-3)، نرسم السهم $\vec{\mathbf{D}}_1$ ليمثل متجه الإزاحة 10.0 km إلى الشرق، ثم نرسم السهم $\vec{\mathbf{D}}_2$ ليمثل متجه الإزاحة 5.0 km إلى الشمال. وقد رسم كلا المتجهين بمقياس الرسم الموضح في الشكل 3-3. محصلة الإزاحة تمثل بالسهم $\vec{\mathbf{D}}_R$ الذي ينطلق من ذيل المتجه الأول وينتهي عند رأس المتجه الثاني. وباستخدام المسطرة، نقيس طول المتجه ونضرب في مقياس الرسم، فنحصل على مقدار متجه المحصلة (11.2 km)، وباستخدام المنقلة نقيس الزاوية θ لنحصل على اتجاه المحصلة $\theta = 27°$ مع محور السينات الموجب. ونستطيع حساب مقدار $\vec{\mathbf{D}}_R$ أيضًا باستخدام نظرية فيثاغورس؛ حيث D_1 و D_2 و D_R تمثل مثلثًا قائم الزاوية، ويكون الضلع D_R هو الوتر؛ حيث:

$$D_R = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} = \sqrt{(10.0\,\text{km})^2 + (5.0\,\text{km})^2} = \sqrt{125\,\text{km}^2} = 11.2\,\text{km}$$

تستطيع استخدام نظرية فيثاغورس بالطبع عندما يكون المتجهان المراد حساب محصلتهما متعامدين على بعضهما بعضًا.



الشكل 3-3 شخص يمشي (10.0 km) شرقًا، ثم (5.0 km) شمالًا. تمثل هاتان الإزاحتان بالمتجهين $\vec{\mathbf{D}}_1$، و $\vec{\mathbf{D}}_2$ على شكل سهمين. الإزاحة المحصلة تمثل بالمتجه $\vec{\mathbf{D}}_R$، وهي عبارة عن حاصل الجمع المتجه لكلّ من $\vec{\mathbf{D}}_1$، و $\vec{\mathbf{D}}_2$. ويبيّن قياس طول المتجه على الرسم باستخدام المسطرة أنّ مقدار $\vec{\mathbf{D}}_R$ هو 11.2 km، ويصنع زاوية مقدارها $\theta = 27°$ باتجاه الشمال الشرقي.

متجه محصلة الإزاحة، $\vec{D}_R$ هو حاصل الجمع المتجه للمتجهين $\vec{D}_1$ و $\vec{D}_2$، أي أنّ:

معادلة متجهة

$$\vec{D}_R = \vec{D}_1 + \vec{D}_2$$

وهذه معادلة متجهة. هنالك حقيقة مهمة مفادها أنه عند إضافة متجهين لا يؤثران في الاتجاه نفسه، فإنّ مقدار محصلتهما لايساوي مجموع مقداري المتجهين، ولكنه أقلّ من حاصل جمع هذين المقدارين:

$$D_R < D_1 + D_2 \quad \text{[المتجهان لا يؤثران في الاتجاه نفسه]}$$

في مثالنا (الشكل 3-3) . $D_R = 11.2\text{ km}$، في حين $D_1 + D_2$ يساوي 15 km. لاحظ أيضاً أننا لا نستطيع القول إنّ $\vec{D}_R$ يساوي 11.2 km؛ لأنّ لدينا معادلة متجهة، و 11.2 km هي فقط جزء من متجه المحصلة (المقدار). ولكننا نستطيع أن نكتب متجه المحصلة كما يلي:

$$\vec{D}_R = \vec{D}_1 + \vec{D}_2 = (11.2\text{ km}, 27°\text{ N of E})$$

تمرين أ: ما الشروط التي يكون فيها مقدار محصلة المتجهين مساويًا لحاصل جمع مقداري المتجهين كلّ على حدة؛ أي أنّ $D_R = D_1 + D_2$.

يوضح (الشكل 3-3) القواعد العامة لطريقة الرسم المستخدمة في إيجاد محصلة متجهين، وهي:

طريقة الذيل للرأس لجمع المتجهات.

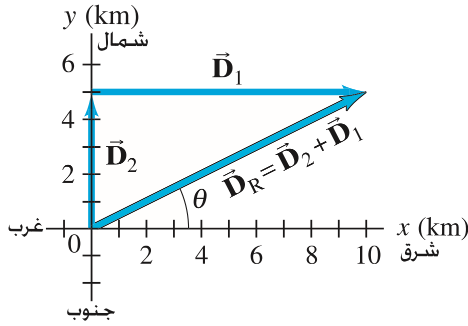
1. على ورق رسم بياني، ارسم أحد المتجهين $\vec{D}_1$ بمقياس رسم مناسب.

2. ارسم المتجه الثاني $\vec{D}_2$ بمقياس الرسم نفسه، بحيث تجعل ذيله على رأس المتجه الأول، وتأكد من صحة الاتجاه (باستخدام المنقلة).

3. السهم المرسوم من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الثاني يمثّل المحصلة $\vec{D}_R$ للمتجهين.

إنّ طول متجه المحصلة يمثل المقدار. لاحظ أنّ المتجهات يمكن أن تنقل إلى مكان آخر بحيث تكون موازية لنفسها (تحافظ على المقدار والاتجاه نفسه). لإنجاز الخطوات السابقة على نحو جيد؛ يمكن أن يقاس طول المحصلة بمسطرة، ثم يضرب في مقياس الرسم. ونستطيع قياس الزوايا باستخدام المنقلة. تسمى هذه الطريقة طريقة الذيل للرأس لجمع المتجهات. وفي هذه الطريقة، ليس مهما بأيّ المتجهين نبدأ أولا. فمثلا، عند إضافة 5.0 km للشمال إلى 10.0 km للشرق، فإنّ المتجه الناتج يعطينا 11.2 km مقداره وبزاوية $\theta = 27°$ (انظر الشكل 3-4). ونحصل على النتيجة نفسها إذا أضفنا المتجهين مع عكس الترتيب (الشكل 3-3)؛ أي أنه على نحو عام يكون كما يلي:

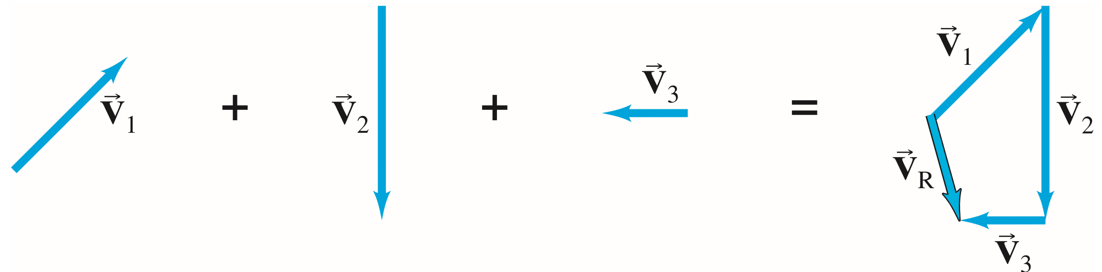
$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 = \vec{V}_2 + \vec{V}_1$$



الشكل 3-4 عند إضافة المتجهات مع عكس ترتيبها، فإننا نحصل على المحصلة نفسها (قارن مع الشكل 3-3).

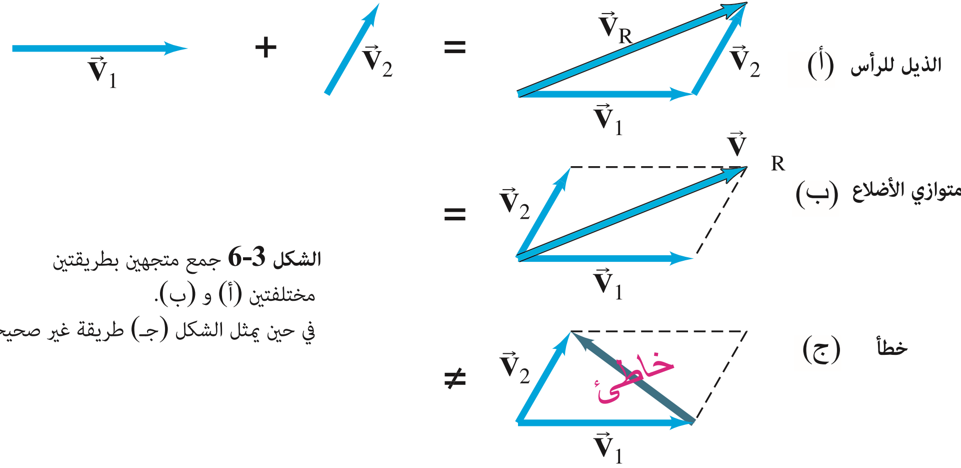
ونستطيع تطبيق طريقة الذيل للرأس لجمع المتجهات على ثلاثة متجهات أو أكثر، وهنا ترسم المحصلة من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الأخير. ومثال ذلك موضح في (الشكل 3-5)، تمثّل المتجهات الثلاثة الموضحة في الشكل إزاحاتٍ بالاتجاهات (شمال شرق، جنوب، غرب) أو بالطبع يمكن أن تمثل ثلاث قوى. تأكد بنفسك من حصولك على النتيجة نفسها بغض النظر عن كيفية ترتيب جمع المتجهات.

الشكل 3-5 محصلة ثلاثة متجهات $\vec{V}_R = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3$



طريقة متوازي الأضلاع لجمع المتجهات.

تُجمع المتجهات بطريقة ثانية، هي **طريقة متوازي الأضلاع**. وهي مماثلة تمامًا لطريقة الذيل للرأس. في هذه الطريقة، يُرسم المتجهان بحيث ينطلقان من النقطة نفسها، ثم يُرسم متوازي أضلاع باستخدام هذين المتجهين، وتكون المحصلة هي القطر الذي يرسم من نقطة انطلاق المتجهين. (الشكل 3-6 ب). طريقة الذيل للرأس موضّحة في (الشكل 3-6 أ)، وواضح أنّ الطريقتين تؤديان إلى النتيجة نفسها.



الشكل 3-6 جمع متجهين بطريقتين مختلفتين (أ) و (ب). في حين يمثل الشكل (جـ) طريقة غير صحيحة.

الشكل 3 - 6 جمع متجهين بطريقتين مختلفتين (أ) و (ب). في حين يمثل الشكل (جـ) طريقة غير صحيحة.

تنويه:
تأكد من استخدام القطر الصحيح لمتوازي الأضلاع لإيجاد المحصلة.

هنالك خطأ شائع في رسم المتجه الذي يمثل المحصلة، بحيث يمثل القطر الواصل بين رأسي المتجهين (كما في الشكل 3-6 ج) وهذا غير صحيح؛ لأنّ هذا المتجه لا يمثل المحصلة أو حاصل جمع المتجهين، ولكنه في الحقيقة يمثل حاصل طرحهما $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$، كما سنرى في البند القادم.

المثال المفاهيمي 3-1

مدى أطوال المتجهين افرض أنّ لديك متجهين طول كلّ منهما ثلاث وحدات. ما المدى الممكن للأطوال التي تمثل حاصل جمعهما؟

الإجابة: يمكن أن يأخذ المجموع أيّ قيمة تتراوح من $(3.0 + 3.0 =)$ 6.0 عندما يكون المتجهان في الاتجاه نفسه إلى $(3.0 - 3.0 =)$ 0 عندما يكون المتجهان متعاكسين.

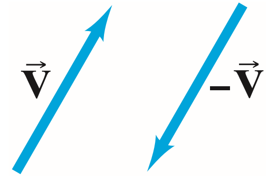
تمرين ب: إذا كان المتجهان في (المثال المفاهيمي 3-1) متعامدين، فما مقدار محصلتهما؟

3-3 طرح المتجهات وضرب المتجه في عدد

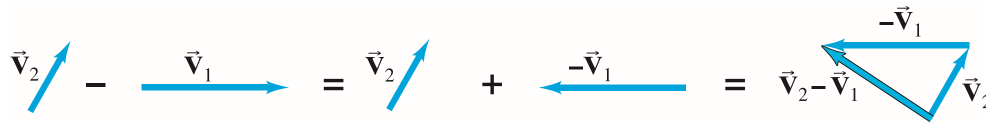
لدينا المتجه $\vec{V}$. يمكن تعريف سالب هذا المتجه $(-\vec{V})$ على أنه مساوٍ له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه، انظر (الشكل 3-7). لاحظ أنه بالنظر إلى مقدار المتجه، لا يوجد معنى منطقي لمفهوم المتجه السالب؛ فمقدار أيّ متجه موجب دائما والإشارة السالبة تخبرنا عن الاتجاه فقط. ونستطيع الآن تعريف حاصل طرح متجهين أو الفرق بينهما $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$ كما يلي:

$$\vec{V}_2 - \vec{V}_1 = \vec{V}_2 + (-\vec{V}_1)$$

ويعني ذلك أنّ الفرق بين متجهين يساوي حاصل جمع المتجه الأول مع سالب المتجه الثاني. ومن ثَمّ، فإنّ قواعد جمع المتجهات يمكن تطبيقها في طرح المتجهات، كما هو موضح في (الشكل 3-8)، باستخدام طريقة الذيل للرأس.

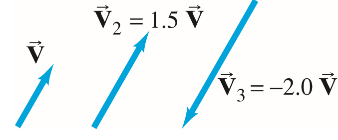


الشكل 3-7 سالب المتجه، هو متجه له المقدار نفسه، ولكنه معاكس له في الاتجاه.



الشكل 3-8 طرح متجهين $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$

المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ يمكن أن يضرب في عدد c. ويمكن تعريف المتجه الناتج $c\vec{\mathbf{V}}$ بأنه متجه له اتجاه $\vec{\mathbf{V}}$ نفسه ومقداره cV، أي أنّ ضرب المتجه في عدد موجب c يغير مقداره (حسب العدد c) ولا يغير اتجاهه. فإذا كان c عددا سالبا، فإنّ مقدار $c\vec{\mathbf{V}}$ يبقى cV (من غير الإشارة السالبة) ولكن الاتجاه يكون معاكسا لاتجاه $\vec{\mathbf{V}}$.



الشكل 3-9: ضرب المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ في عدد c يعطي متجهًا مقداره (c) مرة أكبر وفي اتجاه نفسه إذا كان (c) موجبا، وبالاتجاه المعاكس لـ $\vec{\mathbf{V}}$ إذا كان (c) سالبا.

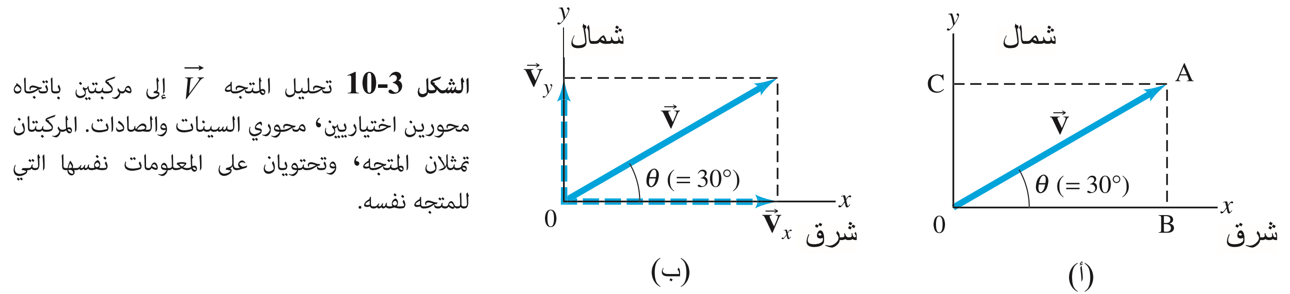
3-4 جمع المتجهات بطريقة المركبات

إنّ جمع المتجهات بطريقة الرسم باستخدام المسطرة والمنقلة لا يتسم عادة بالدقة الكافية، كما أنه غير مفيد عندما تكون المتجهات في ثلاثة أبعاد. لذا، سنناقش هنا طريقة أكثر فاعلية ودقة لجمع المتجهات. ولكن يجب ألا ننسى أنّ طريقة الرسم مفيدة في تخيّل المسألة، وفي تدقيق الحسابات للوصول إلى النتيجة الصحيحة.

تحليل المتجهة لمركباته

ليكن لديك المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ الذي يقع في مستوى معين. يمكن كتابته كناتج جمع متجهين نسميهما **مركبتي** المتجه الأصلي. يتم اختيار المركبتين عادة باتجاه محورين متعامدين. والطريقة المتبعة لإيجاد المركبات تسمى **طريقة تحليل المتجه لمركباته**. وهناك مثال على ذلك موجود في (الشكل 3-10). المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ قد يكون متجه إزاحة يصنع زاوية $\theta = 30°$ إلى الشمال الشرقي. علما بأننا اخترنا محور السّينات الموجب ليمثل الشرق، ومحور الصّادات الموجب ليمثل الشمال. هذا المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ يحلل إلى مركبتيه السّينية (x-component) والصّادية (y-component)، برسم خطوط متقطعة من رأس المتجه (A) (الخطان AB، و AC) بحيث يكونان متعامدين مع المحورين السيني والصادي. ويمثل الخطان 0B، و 0C المركبتين السينية والصادية للمتجه $\vec{\mathbf{V}}$ على الترتيب، كما هو موضح في (الشكل 3-10ب)، وتكتب كلّ من هاتين المركبتين $\vec{\mathbf{V}}_x$ و $\vec{\mathbf{V}}_y$ وتمثلان عادة على شكل سهم مثل باقي المتجهات، ولكنه يكون متقطّعا.

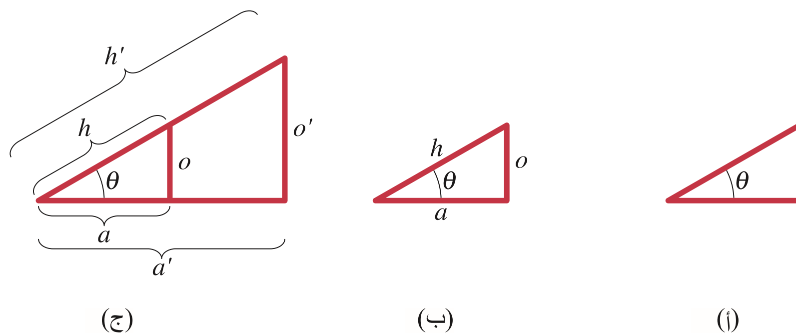
يكتب مقدار كلّ من المركبتين V_x، و V_y على هيئة رقم مع وحداته، ويحمل إشارة (+) عندما يشير إلى الاتجاه الموجب، وإشارة (-) عندما يشير إلى الاتجاه السالب على المحورين السيني والصادي. ويمكن أن نرى في (الشكل 3-10) أنّ $\vec{\mathbf{V}} = \vec{\mathbf{V}}_x + \vec{\mathbf{V}}_y$ عند تطبيق طريقة متوازي الأضلاع لجمع المتجهات.



الشكل 3-10 تحليل المتجه $\vec{V}$ إلى مركبتين باتجاه محورين اختياريين، محوري السينات والصادات. المركبتان تمثلان المتجه، وتحتويان على المعلومات نفسها التي للمتجه نفسه.

يتكون الفضاء من ثلاثة أبعاد، وفي بعض الأحيان يكون من الضروري تحليل المتجه إلى مركباته بثلاثة اتجاهات متعامدة. وفي الإحداثيات المتعامدة، تكون هذه المركبات $\vec{\mathbf{V}}_x$, $\vec{\mathbf{V}}_y$ و $\vec{\mathbf{V}}_z$. إنّ تحليل المتجه بثلاثة أبعاد هو امتداد لطريقة تحليل المتجهات السابقة، ونركز هنا على تحليل المتجه في بعدين، وهو ما نحتاج إليه في هذه المرحلة.

لجمع المتجهات باستخدام طريقة التحليل: نحتاج إلى استخدام الدوال المثلثية: الجيب (*sine*)، وجيب التمام (*cosine*)، والظل (*tangent*)، التي سنعطي عنها فكرة بسيطة على سبيل المراجعة.



الشكل 3-11 ابتداءً من الزاوية θ كما في (أ) نستطيع أن نرسم مثلثات قائمة الزاوية بحجمين مختلفين؛ (ب) و (جـ)، ولكن نسب أطوال أضلاع المثلث لا تعتمد على حجمه.

إذا أعطيت أيّ زاوية كما في (الشكل 3 - 11أ)، فإنك تستطيع رسم مثلث قائم الزاوية عن طريق رسم خط عمودي على أحد ضلعي الزاوية. يسمى أطولُ ضلع في المثلث قائم الزاوية الوتر، ويرمز إليه بـ h، في حين يرمز إلى الضلع المقابل للزاوية بـ o، أما الضلع الجاور لها فيرمز إليه بـ a. فإذا كانت a, h, o تمثل أطوال هذه الأضلاع، فإنك تستطيع تعريف ثلاثة دالات مثلثية هي: الجيب (sine)، وجيب التمام (cosine)، والظل (tangent) كما يلي:

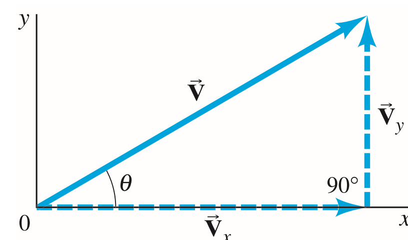
تعريف الدوال المثلثية

$$\sin\theta = \frac{\text{side opposite (المقابل)}}{\text{hypotenuse (الوتر)}} = \frac{o}{h}$$
$$\cos\theta = \frac{\text{side adjacent (المجاور)}}{\text{hypotenuse (الوتر)}} = \frac{a}{h} \qquad \textbf{(1-3)}$$
$$\tan\theta = \frac{\text{side opposite (المقابل)}}{\text{side adjacent (المجاور)}} = \frac{o}{a}$$

إذا رسمنا المثلث بحجم أكبر مع بقاء الزوايا نفسها، فإنّ النسب بين أطوال الأضلاع لا تتغير، وكما في (الشكل 3 - 11جـ) يكون: $a/h = a'/h';\ o/h = o'/h'$ و $o/a = o'/a'$. ومن ثَمّ، فإنّ قيم الجيب، وجيب التمام والظل لا تعتمد على حجم الزاوية، بل تعتمد على الزاوية نفسها. ويمكن إيجاد كلّ من قيم الجيب، وجيب التمام، والظل لزوايا مختلفة باستخدام آلة حاسبة علمية، أو من الجدول المبين في الملحق أ.

تُعدّ المتطابقة المثلثية التالية مهمة، وهي:

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1 \qquad \textbf{(2-3)}$$



$$\sin\theta = \frac{V_y}{V}$$
$$\cos\theta = \frac{V_x}{V}$$
$$\tan\theta = \frac{V_y}{V_x}$$
$$V^2 = V_x^2 + V_y^2$$

الشكل 3-12 إيجاد مركبتي متجه ما باستخدام الدوال المثلثية.

وتتبع هذه المتطابقة نظرية فيثاغورس في (الشكل 3-11) يكون $o^2 + a^2 = h^2$؛ أي أنّ:

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = \frac{o^2}{h^2} + \frac{a^2}{h^2} = \frac{o^2 + a^2}{h^2} = \frac{h^2}{h^2} = 1$$

ولمزيد من التفصيل عن الدوال والمتطابقات المثلثية، انظر الملحق أ.

إنّ استخدام الدوال المثلثية في إيجاد مركبات متجه ما موضح في (الشكل 3-12)؛ إذ يكوّن المتجه ومركبتاه مثلثًا قائم الزاوية؛ حيث نرى أنّ الجيب (sin)، وجيب التمام (cos)، والظل (tan) تعطى كما في الشكل.

مركبتا المتجه

من تعريف الجيب، $\sin\theta = V_y/V$ نجد أنّ

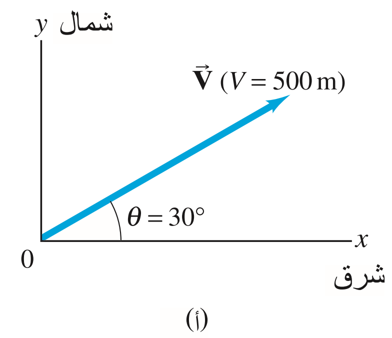
$$V_y = V\sin\theta \qquad \textbf{(3-3أ)}$$

وبالطريقة نفسها من تعريف جيب التمام $\cos\theta$ نحصل على

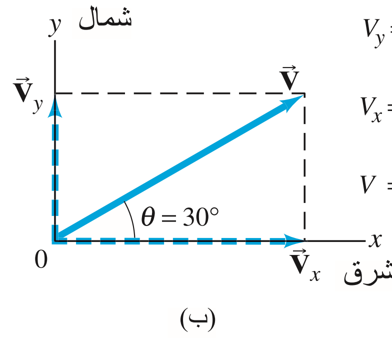
$$V_x = V\cos\theta \qquad \textbf{(3-3ب)}$$

لاحظ أنّ الزاوية θ اختيرت اصطلاحا مع محور السينات الموجب.

وباستخدام (المعادلات 3-3) نستطيع حساب V_x و V_y لأيّ متجه مثل ذاك المرسوم في (الشكلين 3 - 10 و 3 - 12). افرض أنّ $\vec{\mathbf{V}}$ يمثل متجه إزاحة مقداره 500 m.



(أ)



(ب)

الشكل 3 - 13 (أ) يمثل المتجة $\vec{\mathbf{V}}$ إزاحة طولها 500m ويصنع زاوية 30° مع الشمال الشرقي. (ب) مركبتا $\vec{\mathbf{V}}$ وهما $\vec{\mathbf{V}}_x$ و $\vec{\mathbf{V}}_y$ ومقدار كلّ منهما معطى إلى يمين الشكل.

ويصنع زاوية 30° باتجاه الشمال الشرقي، كما هو موضح في (الشكل 3 - 13). $V = 500$ m، من الآلة الحاسبة أو الجداول $\sin 30° = 0.500$ و $\cos 30° = 0.866$ وهنا يكون

$$V_x = V\cos\theta = (500\text{ m})(0.866) = 433\text{ m (شرق)}$$
$$V_y = V\sin\theta = (500\text{ m})(0.500) = 250\text{ m (شمال)}$$

هنالك طريقتان لتحديد متجه ما

هنالك طريقتان لتحديد متجه ما في نظام محاور معيّن هما:

1-إعطاء مركبتي المتجه V_y، و V_x.

2-إعطاء طول المتجه V والزاوية التي يصنعها مع محور السينات الموجب.

ونستطيع التحويل من طريقة إلى أخرى باستخدام (المعادلات 3-3)، وبالعكس باستخدام نظرية فيثاغورس*وتعريف الظل (tangent) كما هو واضح في (الشكل 3-12)

علاقة المركبات بالمقدار والاتجاه

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad \textbf{(4-3أ)}$$

$$\tan\theta = \frac{V_y}{V_x} \quad \textbf{(4-3ب)}$$

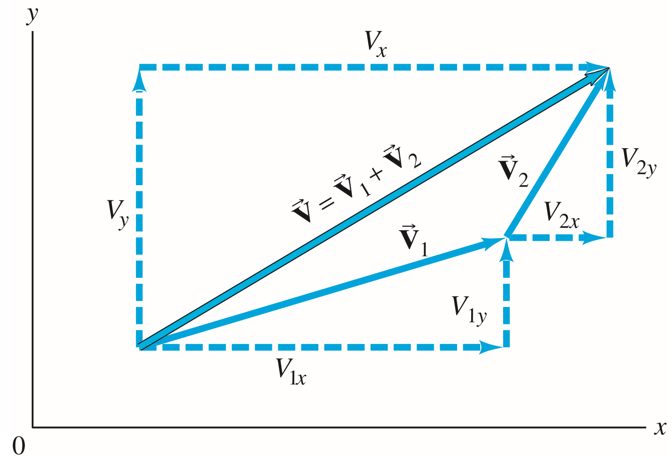
ونستطيع الآن مناقشة كيفية جمع متجهين بطريقة المركبات؛ الخطوة الأولى هي تحليل كلّ متجه إلى مركباته. نلاحظ من (الشكل 3-14) أنّ جمع أيّ متجهين $\vec{\mathbf{V}}_1$ و $\vec{\mathbf{V}}_2$ لإيجاد محصلتهما $\vec{\mathbf{V}} = \vec{\mathbf{V}}_1 + \vec{\mathbf{V}}_2$ يتضمن أنّ

جمع المتجهات بالتحليل (طريقة المركبات)

$$V_x = V_{1x} + V_{2x}$$
$$V_y = V_{1y} + V_{2y} \quad \textbf{(5-3)}$$

أي أنّ جمع المركبات السينيّة يعطي المركبة السينيّة للمحصلة، وجمع المركبات الصاديّة يعطي المركبة الصاديّة للمحصلة. ولا نجمع نهائيا المركبات السينيّة مع المركبات الصاديّة. وإذا أردنا إيجاد مقدار المحصلة واتجاهها، فإننا نستخدم (المعادلات 3-4).

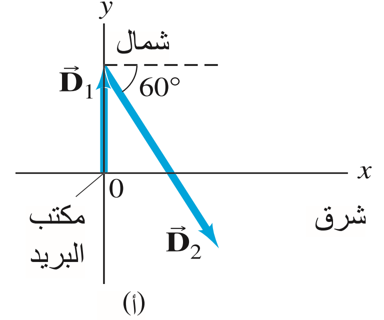
* في الأبعاد الثلاثية، تكون نظرية فيثاغورس: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ حيث تمثل V_z المركبة في البعد الثالث أو المحور z

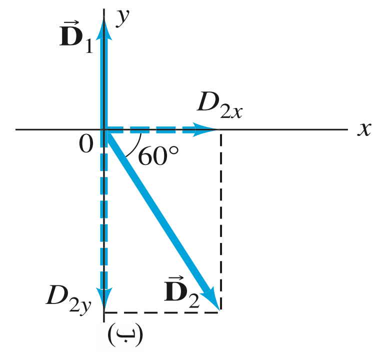


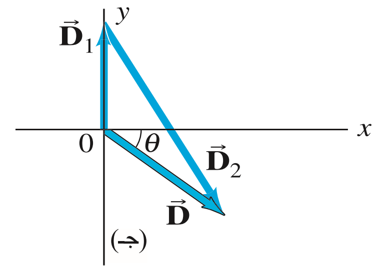
الشكل 3-14
مركبتا المتجة $\vec{\mathbf{V}} = \vec{\mathbf{V}}_1 + \vec{\mathbf{V}}_2$
هما: $V_x = V_{1x} + V_{2x}$ و $V_y = V_{1y} + V_{2y}$

حسن اختيار المحاور يقلل من الجهد المبذول.

تختلف مركبات متجهٍ معيّنٍ باختلاف اختيار محاور الإحداثيات. ويكون تحديد المحاور عند جمع المتجهات اختياريًّا دائمًا. وبالإمكان تسهيل عملية جمع المتجهات بالاختيار الصحيح لمحاور الإحداثيات. فمثلًا، اختيار أحد المحاور باتجاه أحد المتجهات نفسه يجعل هذا المتجه يمتلك مركبة واحدة فقط.







الشكل 3-15 (المثال 3-2)

(أ) متجها الإزاحة $\vec{\mathbf{D}}_1$ و $\vec{\mathbf{D}}_2$. (ب) تحليل $\vec{\mathbf{D}}_2$ إلى مركبتيه. (جـ) $\vec{\mathbf{D}}_1$ و $\vec{\mathbf{D}}_2$ جمعت بطريقة الرسم لإيجاد المحصلة $\vec{\mathbf{D}}$.

طريقة المركبات لجمع المتجهات موضحة في المثال.

المثال 3 - 2 **يغادر ساعي بريد قروي مكتب البريد،** فيتحرك 22.0 km باتجاه الشمال، ثم يتحرك بزاوية 60.0° إلى الجنوب الشرقي مسافة 47.0 km. فما إزاحته من مكتب البريد؟

النّهج: نحلّل كلّ متجه إلى مركبتين سينيّة وصاديّة، ثم نجمع المركبتين السينيتين إلى بعضهما والمركبتين الصاديتين إلى بعضهما للحصول على المركبتين السينية والصادية للمحصلة. نختار محور السينات الموجب ليشير إلى اتجاه الشمال، وهو اتجاه البوصلة المستخدم في الخرائط.

الحلّ: نحلل كلّ متجه إزاحة إلى مركبتيه كما هو واضح في (الشكل 3 - 15ب). حيث $\vec{\mathbf{D}}_1$ له مقدار يساوي 22.0 km باتجاه الشمال، ويكون له مركبة صادية فقط:

$$D_{1x} = 0, \qquad D_{1y} = 22.0\text{ km}$$

$\vec{\mathbf{D}}_2$ له مركبتان سينية وصادية.

$$D_{2x} = +(47.0\text{ km})(\cos 60°) = +(47.0\text{ km})(0.500) = +23.5\text{ km}$$
$$D_{2y} = -(47.0\text{ km})(\sin 60°) = -(47.0\text{ km})(0.866) = -40.7\text{ km}$$

لاحظ أنّ D_{2y} سالب؛ لأنّ هذه المركبة باتجاه محور الصادات السالب. متجه المحصلة $\vec{\mathbf{D}}$ له المركبات التالية:

$$D_x = D_{1x} + D_{2x} = 0\text{ km} + 23.5\text{ km} = +23.5\text{ km}$$
$$D_y = D_{1y} + D_{2y} = 22.0\text{ km} + (-40.7\text{ km}) = -18.7\text{ km}$$

وهذا يحدد متجه الإزاحة على نحو كامل

$$D_x = 23.5\text{ km}, \qquad D_y = -18.7\text{ km}.$$

وتستطيع أيضا تحديد متجه المحصلة بإعطاء مقداره واتجاهه باستخدام (المعادلات 3-4):

$$D = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} = \sqrt{(23.5\text{ km})^2 + (-18.7\text{ km})^2} = 30.0\text{ km}$$

$$\tan\theta = \frac{D_y}{D_x} = \frac{-18.7\text{ km}}{23.5\text{ km}} = -0.796$$

الآلة الحاسبة التي تحتوي على المفاتيح INV TAN، أو ARC TAN، أو TAN^{-1} تعطينا $\theta = \tan^{-1}(-0.796) = -38.5°$. الإشارة السالبة تعني أنّ الزاوية $\theta = 38.5°$ تقع تحت محور السينات كما في (الشكل 3 - 15جـ). ومن ثَمّ، فإنّ محصلة الإزاحة هي 30.0 km باتجاه يصنع زاوية 38.5° مع الجنوب الشرقي.

ملحوظة: انتبه دائمًا إلى الربع الذي يقع فيه متجه المحصلة. الآلات الحاسبة لا تعطينا هذه المعلومة، ولكن الرسم الجيد يبين ذلك.

تعتمد إشارة الدوال المثلثية على الربع الذي تقع فيه الزاوية، فمثلًا، الظل موجب في الربعين الأول والثالث (0° – 90° و 180° – 270°) ولكنه سالب في الربعين الثاني والرابع (انظر الملحق A-7). إنّ أفضل طريقة للتأكد من الزوايا والمتجهات هي رسم مخطط للمتجهات، وهذا المخطط يعطيك نظرة منطقية عند تحليل المسألة، ويوفر طريقة للتأكد من النتائج.

الصندوق التالي، الذي يقدم طريقة لحلّ المسألة يجب ألا يعدّ حلّا كاملا، ولكنه يلخص الأشياء التي يجب عملها لتفكر بعد ذلك في ما يستلزم عمله.

توجيه لحلّ الأسئلة.

التعرف على الربع الصحيح عن طريق رسم مخطط دقيق

طريقة حل المسائل : جمع المتجهات

فيما يلي ملخص لكيفية جمع متجهين أو أكثر باستخدام المركبات:

1. ارسم مخططًا يبين جمع المتجهات بالرسم باستخدام طريقة متوازي الأضلاع، أو طريقة الذيل للرأس.

2. اختر المحورين السيني والصادي بطريقة تسهل جمع المتجهات (مثلا، اختر أحد المحاور باتجاه أحد المتجهات، بحيث تصبح لهذا المتجه مركبة واحدة).

3. حلّل كلّ متجه إلى مركبتين سينية وصادية، ثم بين كل مركبة على محورها على شكل سهم متقطع.

4. احسب كلّ مركبة عن طريق قانوني الجيب وجيب التمام. إذا كانت θ_1 هي الزاوية التي يصنعها المتجه $\vec{\mathbf{V}}_1$ مع محور السينات الموجب، فإنّ

$$V_{1x} = V_1 \cos\theta_1, \qquad V_{1y} = V_1 \sin\theta_1$$

تعامل مع الإشارات بحذر. أي متجه يشير إلى اتجاه محور السينات السالب أو محور الصادات السالب يأخذ إشارة سالبة (-).

5. اجمع المركبات السينية مع بعضها بعضًا لإيجاد المركبة السينية للمحصلة، وكذلك الحال بالنسبة إلى المركبة الصادية.

$$V_x = V_{1x} + V_{2x} + \text{وغيرها}$$
$$V_y = V_{1y} + V_{2y} + \text{وغيرها}$$

تأكد من أنّ الإشارات تعطي المحصلة في الربع الصحيح كما هو مبين في المخطط الموضح في النقطة رقم 1.

6. استخدم المعادلتين (3)، و(4) لإيجاد مقدار المحصلة واتجاهها

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \qquad \tan\theta = \frac{V_y}{V_x}$$

المخطط البياني الذي رسمته يساعدك على إيجاد الموقع الصحيح للمحصلة (الربع) والزاوية θ.

المثال 3-3 ثلاث رحلات قصيرة

تتضمن رحلة طائرة ثلاث مراحل: الأولى 620 km باتجاه الشرق، والثانية 440 km وتصنع زاوية (45°) جنوب شرق، والثالثة 550 km وتصنع زاوية 53° جنوب غرب، كما هو موضح في (الشكل 3-16). ما المحصلة الكلية لإزاحة الطائرة؟

النّهج: نتبع طريقة حلّ الأسئلة الموضحة سابقا.

1. نرسم مخططا للمتجهات (الشكل 3 - 16 أ): حيث $\vec{\mathbf{D}}_1$ و $\vec{\mathbf{D}}_2$ و $\vec{\mathbf{D}}_3$ تمثل مراحل الرحلة الثلاث، ويمثل $\vec{\mathbf{D}}_R$ متجه المحصلة الكلية للإزاحة.

2. اختيار المحاور: المحاور موضحة أيضا في (الشكل 3 - 16 أ).

3. تحليل المتجهات إلى مركباتها السينية والصادية، بحيث نبين كلّ مركبة على شكل سهم متقطع (الشكل 3-15 ب).

4. حساب المركبات

$$\vec{\mathbf{D}}_1: D_{1x} = +D_1\cos 0° = D_1 = 620\text{ km}$$
$$D_{1y} = +D_1\sin 0° = 0\text{ km}$$
$$\vec{\mathbf{D}}_2: D_{2x} = +D_2\cos 45° = +(440\text{ km})(0.707) = +311\text{ km}$$
$$D_{2y} = -D_2\sin 45° = -(440\text{ km})(0.707) = -311\text{ km}$$
$$\vec{\mathbf{D}}_3: D_{3x} = -D_3\cos 53° = -(550\text{ km})(0.602) = -331\text{ km}$$
$$D_{3y} = -D_3\sin 53° = -(550\text{ km})(0.799) = -439\text{ km}$$

الإشارات السالبة تعني أنّ المتجهات باتجاه المحورين السيني والصادي السالبين. المركبات جميعها مبينة في الجدول الموجود في الحاشية.

5. جمع المركبات: نجمع كلّا من المركبات السينية والصادية إلى بعضها، كلّ على حدة لإيجاد المركبتين السينية والصادية للمحصلة

$$D_x = D_{1x} + D_{2x} + D_{3x} = 620\text{ km} + 311\text{ km} - 331\text{ km} = 600\text{ km}$$
$$D_y = D_{1y} + D_{2y} + D_{3y} = 0\text{ km} - 311\text{ km} - 439\text{ km} = -750\text{ km}$$

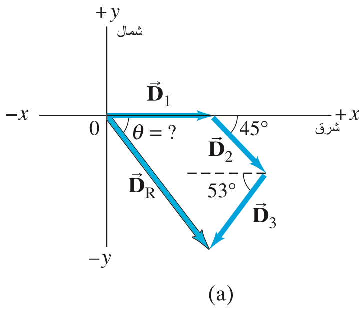
المركبات السينية 600 km شرقا والمركبة الصادية 750 km- جنوبا، وهذه إحدى الطرائق لإعطاء الإجابة.

6. إيجاد مقدار المحصلة واتجاهها.

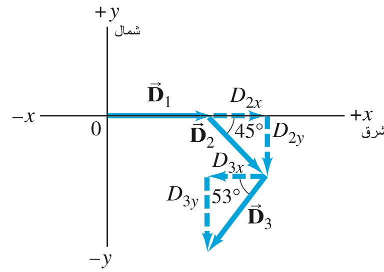
$$D_R = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} = \sqrt{(600)^2 + (-750)^2}\text{ km} = 960\text{ km}$$

$$\tan\theta = \frac{D_y}{D_x} = \frac{-750\text{ km}}{600\text{ km}} = -1.25 \quad \text{لذا فإن} \quad \theta = -51°$$

وعليه، يكون مقدار المحصلة الكلية للإزاحة 960 km، وتصنع زاوية مقدارها 51° تحت محور السينات الموجب (باتجاه الجنوب الشرقي)، كما هو موضح في (الشكل 3-16أ).



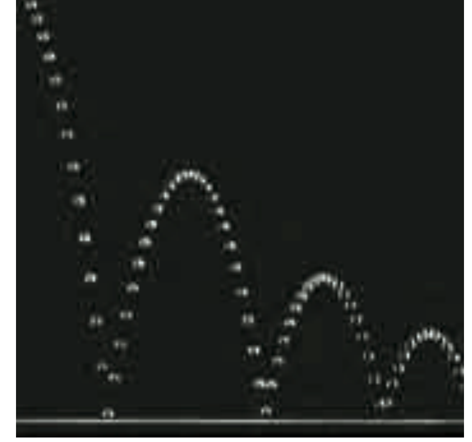
(a)



الشكل 3-16 المثال 3-3

المتجه	المركبات x (km)	y (km)
$\vec{\mathbf{D}}_1$	620	0
$\vec{\mathbf{D}}_2$	311	−311
$\vec{\mathbf{D}}_3$	−331	−439
$\vec{\mathbf{D}}_R$	600	−750

5-3 حركة المقذوفات

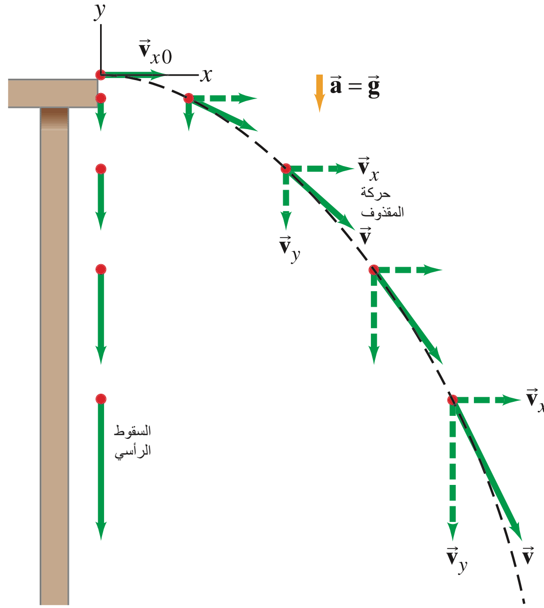


الشكل 3-17 هذه الصور المتتالية المأخوذة بواسطة المصباح النابض لكرة تكون سلسلة من الارتدادات عن سطح الأرض، ترينا مسار القطع المكافئ لحركة المقذوفات.

درسنا في الفصل الثاني الحركة في بعد واحد بدلالة الإزاحة والسرعة والتسارع، بما فيها الحركة الرأسية للأجسام المتسارعة تحت تأثير الجاذبية الأرضية. وسنختبر الآن الحركة العامة للأجسام في الهواء في بعدين بالقرب من سطح الأرض، مثل كرة الجولف المقذوفة، أو كرة البيسبول المضروبة، أو كرة القدم المركولة، وقذيفة المدفع. هذه كلها أمثلة على حركة المقذوفات (انظر الشكل 3-17)، التي نستطيع أن نصفها على أنها تحدث في بعدين. ومع أنّ مقاومة الهواء مهمة، إلا أنه في حالات كثيرة يمكن إهمالها، وسنهمل هنا الاحتكاك عند تحليل حركة المقذوفات. سنركز فيما يلي على دراسة حركة المقذوفات بعد إطلاقها وقبل استقرارها على الأرض، بغض النظر عن الطريقة التي أُطلقت بها. وسنحلل الحركة عندما تتحرك الأجسام على نحو حرّ تحت تأثير الجاذبية فقط، ومن ثَمّ يكون مقدار تسارع الأجسام $g = 9.80\ \mathrm{m/s^2}$ إلى الأسفل، مع افتراض أنّ هذا التسارع ثابت دائما*.

كان جاليليو أول من وصف حركة المقذوفات بدقة، وبيّن أنه يمكن فهم هذه الحركة بتحليلها إلى مركبتين: عمودية وأفقية، والتعامل مع كلّ منهما على نحو منفصل، وللتسهيل: نفترض أنّ الحركة تبدأ عند الزمن $t = 0$ ومن نقطة الأصل للمحورين السيني والصادي $(x_0 = y_0 = 0)$.

نحلل الحركتين الأفقية والعمودية على نحو منفصل.



الشكل 3-18 حركة المقذوفات لكرة صغيرة أُطلقت أفقيا. تمثل الخطوطُ السود المتقطعة مسارَ الجسم. متجه السرعة $\vec{\mathbf{v}}$ عند أيّ نقطة باتجاه الحركة هو مماس لمسار الحركة. تعطى متجهات السرعة بالسهم الأخضر، والمركبات بالسهم المتقطع. (إلى اليسار جسم ساقط سقوطا حرًا إلى الأسفل منطلقا من النقطة نفسها، المركبة الصادية v_y هي نفسها في السقوط الحرّ وفي حركة المقذوف).

$\vec{\mathbf{v}}$ هي المماس لمسار الحركة.

إذا نظرنا إلى كرة تتدحرج عند نهاية طاولة أفقية بسرعة أفقية مقدارها v_{x0} مع الاتجاه الأفقي (x) (انظر الشكل 3-18)، وفي الوقت نفسه هناك جسم يسقط من النقطة نفسها سقوطا حرًا للمقارنة، فإنّ متجه السرعة $\vec{\mathbf{v}}$ عند أيّ نقطة باتجاه حركة الكرة يكون دائما مماسا لمسار الحركة. وإذا اتبعنا أفكار جاليليو، فإننا نتعامل مع مركبتي السرعة v_x و v_y على نحو منفصل، ونستطيع تطبيق معادلات الحركة (المعادلات 2 - 11) على المركبتين السينية والصادية للسرعة.

الحركة العمودية $(a_y = (\text{ثابت}) = -g)$

في البداية، سنختبر المركبة العمودية (y-component) للحركة. عند اللحظة التي تترك فيها الكرة سطح الطاولة $(t = 0)$، يكون للسرعة مركبة سينية فقط. وبمجرد أن تترك الكرة سطح الطاولة، تبدأ بالتسارع عموديا نحو الأسفل بتسارع الجاذبية الأرضية g. لذا، تكون السرعة الصادية (العمودية) الابتدائية مساوية للصفر، $(v_{y0} = 0)$ ثم تبدأ بالازدياد باستمرار (باتجاه الأسفل) إلى أن تصطدم الكرة بالأرض. إذا أخذنا المحور الصادي y موجبا إلى الأعلى، فإنّ $a_y = -g$. ومن (المعادلة 2-11 أ) نستطيع أن نكتب $v_y = -gt$، حيث عوضنا $v_{y0} = 0$. وتعطى الإزاحة العمودية كما يلي: $y = -\frac{1}{2}gt^2$.

* ومن شأن ذلك تحديد الأجسام التي ترتحل بعيدًا عن الأرض، ويكون ارتفاعها فوق سطحها صغيرًا بالمقارنة مع نصف قطر الأرض (6400 km).



الشكل 3-19 صورة متتالية ترينا مواقع كرتين في فترات زمنية متتالية. إحدى الكرتين تسقط سقوطا حرّا، وفي الوقت نفسه، تنطلق الكرة الثانية أفقيا. الارتفاع لكلتا الكرتين يبدو نفسه (متساو عند الزمن نفسه).

الحركة الأفقية. ($a_x = 0$، v_x = ثابت)

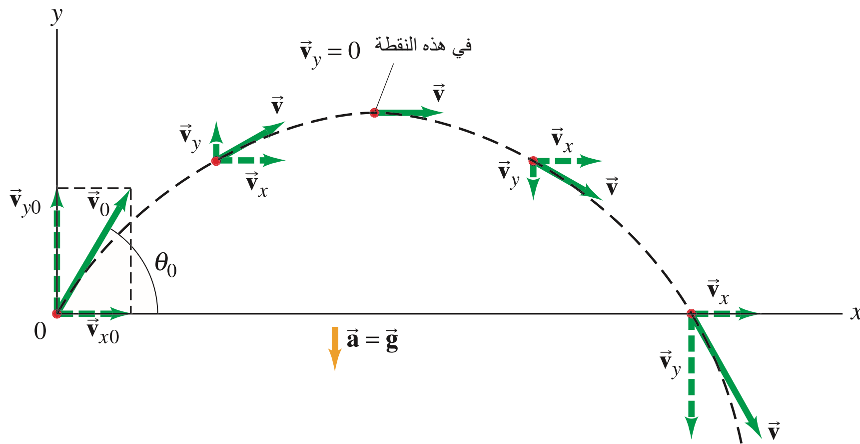
ومن جهة أخرى، فإنه لا يوجد تسارع (مع إهمال مقاومة الهواء) في الاتجاه الأفقي. ولذلك تكون المركبة الأفقية للسرعة v_x ثابتة دائما، وتساوي السرعة الأفقية الابتدائية v_{x0}. وعليه، فإنّ هذه المركبة لها المقدار نفسه عند أيّ نقطة على مسار الحركة. تعطى الإزاحة الأفقية حسب العلاقة $x = v_{x0}t$. ويمكن جمع مركبتي السرعة $\vec{v}_y$, $\vec{v}_x$ بطريقة المتجهات لإيجاد متجه السرعة $\vec{v}_y$ عند أيّ زمن (عند أيّ نقطة على مسار الحركة) كما هو موضح في (الشكل 3-18).

إحدى نتائج هذا التحليل، الذي استنتجه جاليليو نفسه، هو أنّ الجسم الذي يقذف أفقيا يصل إلى الأرض في الوقت نفسه مع الجسم الذي يسقط سقوطا حرّا إلى الأسفل؛ لأنّ الحركة العمودية هي نفسها لكلا الجسمين. و(الشكل 3-19) يبيّن تجربة تؤكد هذا.

تمرين (جـ) إذا تدحرجت كرتان على سطح طاولة بسرعتين مختلفتين، ثمّ سقطتا من سطح الطاولة في الوقت نفسه، فأيهما ستصطدم بالأرض أولا؟

جسم مقذوف نحو الأعلى.

إذا أُطلق جسم بزاوية إلى الأعلى (كما هو واضح في الشكل 3 - 20)، فإننا نحلل الحركة بالطريقة نفسها، باستثناء أننا الآن لدينا سرعة ابتدائية للحركة العمودية v_y، ولأنّ تسارع الجاذبية الأرضية يؤثر نحو الأسفل، فإنّ السرعة v_y تقل تدريجيا مع الزمن إلى أن تصل إلى أعلى نقطة على المسار حيث تكون عندها $v_y = 0$، وبعد ذلك يبدأ الجسم بالحركة نحو الأسفل (الشكل 3 - 20)، وتبدأ v_y بالتزايد إلى الأسفل (تصبح أكثر سالبية) وتبقى المركبة السينية v_x ثابتة كما مرّ معنا سابقا.



الشكل 3 - 20 مسار مقذوف انطلق بسرعة ابتدائية $\vec{v}_0$ وبزاوية θ مع الأفقي. المسار موضح باللون الأسود. متجهات السرعة موضحة بالأسهم الخضراء، والمركبات موضحة بالأسهم المتقطعة.

6-3 أمثلة محلولة على حركة المقذوفات

سنحلّ الآن مجموعة من الأمثلة الكمية على حركة المقذوفات باستخدام (معادلات الحركة 2-11أ إلى 2-11جـ) للمركبتين الأفقية والعمودية كلّ على حدة. هذه المعادلات مفصّلة في (الجدول 3-1) لمركبتي الحركة السينية x والصادية y، وتمثل الحالة العامة للحركة في بعدين بتسارع ثابت. لاحظ أنّ x، و y تمثلان الإزاحتين v_x، و v_y مركبتا السُرعة أما a_x، و a_y فهما مركبتا التسارع. الصفر الذي أسفل الكمية يعني عند الزمن $(t = 0)$.

الجدول 3-1: معادلات الحركة العامة بتسارع ثابت في بعدين.

المركبة x (الأفقية)		المركبة y (العمودية)
$v_x = v_{x0} + a_x t$	(معادلة 2-11 أ)	$v_y = v_{y0} + a_y t$
$x = x_0 + v_{x0} t + \frac{1}{2} a_x t^2$	(معادلة 2-11 ب)	$y = y_0 + v_{y0} t + \frac{1}{2} a_y t^2$
$v_x^2 = v_{x0}^2 + 2a_x(x - x_0)$	(معادلة 2-11 جـ)	$v_y^2 = v_{y0}^2 + 2a_y(y - y_0)$

حلّ الأسئلة:

اختيار الفترة الزمنية.

نستطيع أن نبسط هذه المعادلات في حالة حركة المقذوفات لأنّ $a_x = 0$، انظر (الجدول 3 - 2)، الذي يعتبر أن الاتجاه الموجب لـ y هو نحو الأعلى، ومن ثَمّ يكون $a_y = -g = -9.80\ \text{m/s}^2$. لاحظ أنّ θ اختيرت مع محور السينات الموجب ($+x$- axis) كما في (الشكل 3-20). ومن ثَمّ يكون $v_{x0} = v_0 \cos\theta, v_{y0} = v_0 \sin\theta$ في حلّ الأمثلة على حركة المقذوفات، يجب أن نأخذ الفترات الزمنية التي يكون فيها الجسم محلقا في الهواء وتحت تأثير الجاذبية الأرضية فقط، ولا نأخذ بالحسبان عملية الإطلاق أو الزمن بعد استقرار الجسم على سطح الأرض $\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{g}}$.

الجدول 3-2: معادلات الحركة للمقذوفات
(الايجابية التصاعدي y ؛ $a_x = 0, a_y = -g = -9.80\ \text{m/s}^2$)

الحركة الأفقية ($a_x = 0, v_x =$ ثابت)		الحركة العمودية [1] ($a_y = -g =$ ثابت)
$v_x = v_{x0}$	(معادلة 2-11 أ)	$v_y = v_{y0} - gt$
$x = x_0 + v_{x0} t$	(معادلة 2-11 ب)	$y = y_0 + v_{y0} t - \frac{1}{2} g t^2$
	(معادلة 2-11 جـ)	$v_y^2 = v_{y0}^2 - 2g(y - y_0)$

(1) إذا أخذنا الاتجاه الموجب نحو الأسفل، فإنّ الإشارة السالبة لتسارع الجاذبية الأرضية تصبح موجبة.

طريقة حل المسائل: حركة المقذوفات

سنطبق هنا طريقة حلّ الأسئلة الموضحة في (البند 2-6). طريقة حلّ الأسئلة على حركة المقذوفات هي طريقة مبتكرة لا تتبع القواعد نفسها دائما.

1. كالعادة، **اقرأ** السؤال بعناية، ثم اختر الجسم أو الأجسام التي ستحللها.

2. **ارسم** بدقة **مخططا** يوضح ما حدث لهذا الجسم.

3. **اختر** نقطة أصل، ثمّ حدد أنظمة الإحداثيات السينية والصادية (xy).

4. حدّد الفترة الزمنية، وهي الجزء من حركة المقذوف الذي يكون فيه تحت تأثير الجاذبية فقط (من غير **الزمن المستغرق** في الإطلاق أو الزمن بعد الاستقرار على سطح الأرض). الفترة الزمنية ستكون نفسها عند تحليل المركبتين السينية أو الصادية، والحركتان السينية والصادية مرتبطتان مع بعضها بعضًا بالزمن ذاته.

5. **اختبر** الحركتين السينية والصادية على نحو منفصل، إذا أعطيت سرعة ابتدائية، فيجب تحليلها إلى مركبتين سينية وصادية.

6. حدّد كلّا من **الكميات المعلومة والمجهولة**. اختر $a_x = 0$ و $a_y = -g$، أو $+g$ حيث $g = 9.80\ \text{m/s}^2$. يعتمد استخدام الإشارتين الموجبة $(+)$ أو السالبة (-) على اختيار المحور الصادي الموجب $(+y)$ إلى الأسفل أو إلى الأعلى. تذكر أنّ v_x لا تتغير أبدا على مسار الحركة، كما أنّ $v_y = 0$ عند أقصى نقطة على مسار الحركة، ويتحرك بعدها الجسم باتجاه الأسفل. إنّ السرعة قبل الاستقرار على سطح الأرض مباشرة لا تساوي صفرا.

7. فكّر قبل استخدام المعادلات. خطّط بدقة، ثم **طبّق المعادلات** الموجودة في (الجدول 3-2). استخدم (المعادلتين 3 - 4) لإيجاد مقدار محصلة السرعة واتجاهها.

المثال 3-4 سائق يقود دراجة نارية

يتحرك أفقيا بالقرب من نهاية تلة ارتفاعها 50.0 m. كم ستكون سرعته عند لحظة مغادرته التلة ليهبط على أرض أفقية تقع تحت مستوى التلة، وعلى مسافة 90.0 m من قاعدتها؟

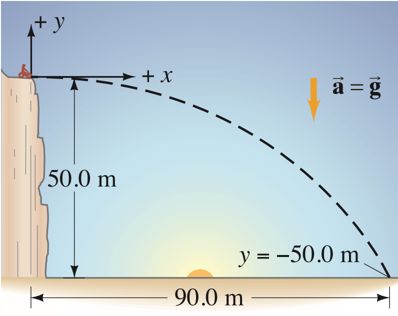
النّهج: نتبع طريقة حلّ الأسئلة الموضحة سابقا.

الحلّ: 1 و2. اقرأ، اختر الجسم، ارسم مخططًا. الجسم في هذه الحالة هو الدراجة النارية، والمخطط موضح في (الشكل3-21).

3. اختر أنظمة الإحداثيات. نختار المحور الصادي ليكون موجبا إلى الأعلى، مع جعل قمة التلة عند $y_0 = 0$، محور السينات (x) يمثل المحور الأفقي مع $x_0 = 0$ عند النقطة التي تغادر فيها الدراجة النارية التلة.

4. اختر الفترة الزمنية. نختار الفترة الزمنية بحيث تبدأ عند $(t = 0)$ في اللحظة التي تغادر فيها الدراجة النارية التلة عند الموقع $x_0 = 0, y_0 = 0$، وتنتهي قبل اصطدامها بالأرض مباشرة.

5. اختبر الحركتين السينية والصادية. في الاتجاه الأفقي (x)، يكون التسارع $a_x = 0$ لأنّ السرعة ثابتة. مقدار x عندما يصطدم الجسم بالأرض هو $x = +90.0\text{ m}$. ويكون التسارع في الاتجاه العمودي مساويًا لتسارع الجاذبية الأرضية للأسفل: أي أنّ $a_y = -g = -9.80\text{ m/s}^2$، مقدار y عندما يصطدم الجسم بالأرض هو $y = -50.0\text{ m}$، السرعة الابتدائية هي سرعة أفقية، وهي المجهول هنا v_{x0}. السرعة الابتدائية العمودية تساوي صفرا، $v_{y0} = 0$.



الشكل 3-21 (المثال 3-4)

المعلوم	المجهول
$x_0 = y_0 = 0$	v_{x0}
$x = 90.0\text{ m}$	t
$y = -50.0\text{ m}$	
$a_x = 0$	
$a_y = -g = -9.80\text{ m/s}^2$	
$v_{y0} = 0$	

6. حدّد كلّا من الكميات المعلومة والمجهولة: بالنظر إلى الجدول في الحاشية، نلاحظ أنه بالإضافة إلى عدم معرفتنا السرعة الابتدائية الأفقية v_{x0} (التي تبقى ثابتة دائما)، فإننا لا نعرف أيضا الزمن اللازم لوصول الدراجة النارية إلى سطح الأرض.

7. طبّق المعادلات المناسبة: الدراجة النارية لها سرعة سينية v_x ثابتة ما دامت محلقة في الهواء. زمن التحليق في الهواء يحدد من الحركة العمودية عند اصطدام الجسم بالأرض. ومن ثمّ فإننا نجد أولا الزمن من الحركة العمودية (الحركة باتجاه المحور y) ثم نستخدم هذا الزمن في المعادلات بالاتجاه الأفقي (باتجاه المحور x). لحساب الزمن اللازم لوصول الدراجة النارية إلى سطح الأرض؛ نستخدم (المعادلة 2-11 ب) في (الجدول 3-2) للحركة الرأسية (y) حيث $v_{y0} = 0$ و $y_0 = 0$

$$y = y_0 + v_{y0}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2$$
$$= 0 + 0 + \tfrac{1}{2}(-g)t^2$$

أو

$$y = -\tfrac{1}{2}gt^2$$

وبتعويض $y = -50.0\text{ m}$ نجد مقدار t كما يلي:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{-g}} = \sqrt{\frac{2(-50.0\text{ m})}{-9.80\text{ m/s}^2}} = 3.19\text{ s}$$

ولحساب السرعة الابتدائية v_{x0}؛ نستخدم أيضا (المعادلة 2-11 ب) ولكن هنا للحركة الأفقية: حيث $x_0 = 0$ و $a_x = 0$

$$x = x_0 + v_{x0}t + \tfrac{1}{2}a_x t^2$$
$$= 0 + v_{x0}t + 0$$

أو

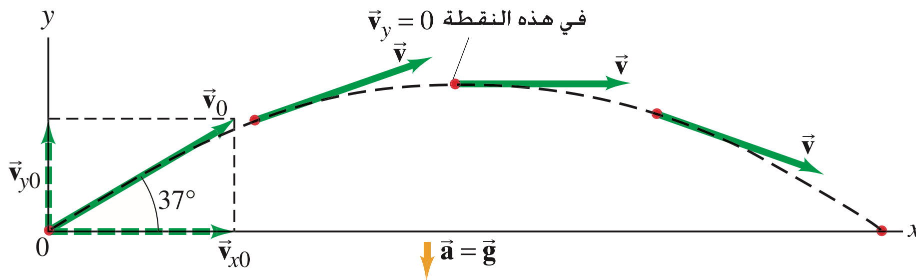
$$x = v_{x0}t.$$

إذن،

$$v_{x0} = \frac{x}{t} = \frac{90.0\text{ m}}{3.19\text{ s}} = 28.2\text{ m/s},$$

وهذه السرعة تساوي 100 km/h (تقريبا 60 mi/h)

ملحوظة: في الفترة الزمنية الكلية لحركة المقذوف، يكون التسارع الوحيد هو g باتجاه المحور الصادي السالب (y-direction) والتسارع باتجاه المحور السيني (x) يساوي صفرًا دائما.



الشكل 3-22 (المثال 3-5)

تطبيق الفيزياء في الرياضة

المثال 3-4 **ركل لاعب كرة قدم** بقدمه بزاوية $\theta_0 = 37.0°$، وبسرعة مقدارها $20.0\ \text{m/s}$ كما هو موضح في (الشكل 3-22)، احسب ما يلي:

أ) أقصى ارتفاع.

ب) الزمن اللازم حتى تصطدم الكرة بالأرض.

جـ) المدى الأفقي الذي قطعته الكرة قبل اصطدامها بالأرض.

د) متجه السرعة عند أقصى ارتفاع.

هـ) متجه التسارع عند أقصى ارتفاع.

افرض أنّ الكرة غادرت من مستوى سطح الأرض، وأنّ مقاومة الهواء مهملة.

النّهج: يبدو هذا السؤال صعبا لأول وهلة؛ لأنّ هنالك الكثير من التساؤلات، ولكننا نستطيع معالجة كلّ واحد منها على حدة. نختار المحور الصادي ليكون موجبا نحو الأعلى، ثم نتعامل مع الحركتين الأفقية والعمودية على نحو منفصل. يُحدَّد زمن التحليق الكليّ مرة أخرى من الحركة العمودية (باتجاه المحور y). تكون الحركة الأفقية (باتجاه المحور x) بسرعة ثابتة. المركبة الصادية (v_y) للسرعة تكون متغيرة، حيث تكون موجبة إلى الأعلى في البداية، ثم تقل إلى أن تصبح صفرا عند أقصى ارتفاع، ثم تصبح سالبة بعد ذلك عندما تبدأ الكرة بالعودة إلى سطح الأرض.

الحل: نحلل السرعة الابتدائية إلى مركبتين هما:

$$v_{x0} = v_0 \cos 37.0° = (20.0\ \text{m/s})(0.799) = 16.0\ \text{m/s}$$
$$v_{y0} = v_0 \sin 37.0° = (20.0\ \text{m/s})(0.602) = 12.0\ \text{m/s}$$

(أ) نأخذ بالحسبان الفترة الزمنية منذ أن تفقد الكرة اتصالها بالأرض إلى أن تصل إلى أقصى ارتفاع. خلال هذه الفترة يكون التسارع g إلى الأسفل. وعند أقصى ارتفاع، تكون السرعة أفقية فقط (الشكل 3-22) ولذلك تكون $v_y = 0$ ويحصل هذا عند زمن تحدده العلاقة $v_y = v_{y0} - gt$.

بتعويض $v_y = 0$ (انظر المعادلة 2-11أ في الجدول 3-2) يكون

$$t = \frac{v_{y0}}{g} = \frac{(12.0\ \text{m/s})}{(9.80\ \text{m/s}^2)} = 1.22\ \text{s}$$

من (المعادلة 2-11 ب) وبتعويض $y_0 = 0$ نحصل على

$$y = v_{y0}t - \tfrac{1}{2}gt^2$$
$$= (12.0\ \text{m/s})(1.22\ \text{s}) - \tfrac{1}{2}(9.80\ \text{m/s}^2)(1.22\ \text{s})^2 = 7.35\ \text{m}$$

وبطريقة أخرى، نستطيع استخدام (المعادلة 2-11جـ) لإيجاد y

$$y = \frac{v_{y0}^2 - v_y^2}{2g} = \frac{(12.0\ \text{m/s})^2 - (0\ \text{m/s})^2}{2(9.80\ \text{m/s}^2)} = 7.35\ \text{m}$$

لذا، يكون أقصى ارتفاع $7.35\ \text{m}$.

(ب) لإيجاد الزمن اللازم لعودة الكرة إلى سطح الأرض (زمن التحليق الكلي)؛ نأخذ فترات زمنية مختلفة تبدأ من اللحظة التي تغادر بها الكرة سطح الأرض $(t = 0, y_0 = 0)$ وتنتهي قبل اصطدامها بها (مرة أخرى تكون $y = 0$). نستطيع استخدام (المعادلة 2-11 ب) بتعويض $y_0 = 0$، وكذلك $y = 0$ (مستوى سطح الأرض):

$$y = y_0 + v_{y0}t - \tfrac{1}{2}gt^2$$
$$0 = 0 + (12.0\ \text{m/s})t - \tfrac{1}{2}(9.80\ \text{m/s}^2)t^2$$

ونستطيع حلّ هذه المعادلة بسهولة كما يلي:

$$\left[\tfrac{1}{2}(9.80\ \text{m/s}^2)t - 12.0\ \text{m/s}\right]t = 0$$

وهنالك حلّان لهذه المعادلة: أحدهما $t = 0$ وهذا يعود لنقطة البداية y_0، والثاني هو

$$t = \frac{2(12.0\ \text{m/s})}{(9.80\ \text{m/s}^2)} = 2.45\ \text{s}$$

وهذا هو زمن التحليق الكلّيّ للكرة.

زمن الصعود = زمن الهبوط

ملحوظة: زمن التحليق الكلي $t = 2.45\,\text{s}$ يساوي ضعف الزمن اللازم للوصول إلى أقصى ارتفاع المحسوب في (أ)؛ أي أنّ زمن الصعود إلى أقصى ارتفاع يساوي زمن الهبوط من أقصى ارتفاع إلى مستوى الإطلاق نفسه عند إهمال مقاومة الهواء فقط.

(جـ) نستطيع إيجاد المسافة الكلية التي يقطعها الجسم على محور السينات (x) بتطبيق (المعادلة 11-2 ب) مع تعويض $x_0 = 0,\ a_x = 0,\ v_{x0} = 16.0\,\text{m/s}$:

$$x = v_{x0}t = (16.0\,\text{m/s})(2.45\,\text{s}) = 39.2\,\text{m}$$

(د) عند أقصى ارتفاع، لا توجد مركبة عمودية للسرعة، ولكن توجد مركبة أفقية فقط (وهي ثابتة طوال فترة التحليق)، ولذلك تكون $v = v_{x0} = v_0 \cos 37.0^\circ = 16.0\,\text{m/s}$.

(هـ) متجه التسارع عند أقصى ارتفاع هو نفسه خلال فترة التحليق، ويساوي 9.80m/s^2 نحو الأسفل.

ملحوظة: تعاملنا مع الكرة على أنها جسيم، مع إهمال كلّ من دورانه ومقاومة الهواء له، والتي يكون لها تأثير عند دورانها. لذا، فإنّ النتائج التي حصلنا عليها ليست دقيقة جدا.

تمرين د: قُذفت كرتان في الهواء بزاويتين مختلفتين. إذا كان أقصى ارتفاع للكرتين متساويا، فأيّ منهما تبقى في الهواء لفترة أطول: الكرة التي قُذفت بزاوية أقلّ، أم التي قُذفت بزاوية أكبر؟

المثال المفاهيمي 6-3 أين تستقر التفاحة؟

يجلس طفل في عربة تتحرك بسرعة ثابتة إلى اليمين، كما هو موضح في (الشكل 23-3). فإذا قذف الطفل تفاحة عموديا إلى الأعلى في أثناء سير العربة، وإذا أهملنا مقاومة الهواء، فأين ستسقط التفاحة بالنسبة إلى العربة: (أ) خلفها؟ أم (ب) فيها؟ أم (جـ) أمامها؟

الاستجابة: يقذف الطفل التفاحة عموديا صوب الأعلى بالنسبة إلى محاور الإسناد الخاصة به بسرعة $\vec{\mathbf{v}}_{y0}$ (الشكل 3 - 23 أ)، ولكن بالنسبة إلى شخص على سطح الأرض، فإنّ التفاحة تمتلك سرعة ابتدائية أفقية تساوي سرعة العربة $\vec{\mathbf{v}}_{x0}$، وستتبع مسار المقذوف المبين في (الشكل 23-3 ب). لا يوجد تسارع أفقي. وعليه، تبقى $\vec{\mathbf{v}}_{x0}$ ثابتة وتساوي سرعة العربة، وبما أنّ التفاحة تتبع مسارها، فإنّ العربة تبقى مباشرة تحت التفاحة في الأوقات جميعها؛ لأنّ لديهما السرعة الأفقية نفسها دائما، ومن ثَمّ ستسقط التفاحة بين يدي الطفل داخل العربة. إذن، فالحل هو (ب).

(أ) محاور الإسناد بالنسبة للعربة

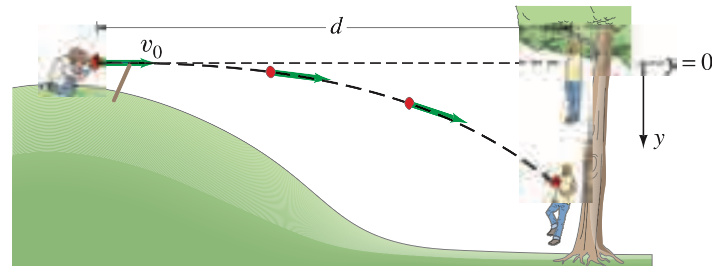
(ب) محاور الإسناد بالنسبة إلى الأرض

الشكل 23-3 (المثال 6-3)

المثال المفاهيمي 7-3 الاستراتيجية الخطأ

يجلس صبيّ على تلة صغيرة، وباستخدام مقلاع، يقذف أفقيًّا بالونًا مملوءًا بالماء على صبيّ آخر معلق على فرع شجرة ويبعد مسافة d كما هو مبين في (الشكل 24-3). في اللحظة نفسها التي يطلق فيها الصبيّ الأول القذيفة، يسقط الصبيّ الثاني إلى الأسفل كي يتجنب القذيفة. بيّن أنّ ما عمله الصبيّ الثاني هو حركة خطأ (فهو لم يدرس الفيزياء بعد). أهمل مقاومة الهواء.

الاستجابة: يسقط كلّ من البالون المائي والصبي الموجود على الشجرة في اللحظة نفسها، وعند زمن معين t، تكون لهما المسافة العمودية نفسها $y = \frac{1}{2}gt^2$ (كالوضع المبين في الشكل 19-3). خلال الزمن الذي يقطع فيه البالون المائي مسافة أفقية (d)، يكون له الموقع العمودي نفسه (y) الذي يقطعه الصبي الذي يسقط من الشجرة، ومن ثَمّ ستصيبه القذيفة. لو بقي الصبي على الشجرة لتجنب الإصابة بالبالون المائي.



الشكل 24-3 (المثال 7-3)

تمرين هـ: سقط طرد من طائرة تطير بسرعة ثابتة موازية لسطح الأرض. إذا أهملنا مقاومة الهواء، فإنّ الطرد: (أ) سيسقط خلف الطائرة. (ب) سيسقط مباشرة تحت الطائرة إلى أن يصطدم بالأرض. (جـ) سيتحرك أمام الطائرة. (د) يعتمد على سرعة الطائرة. أيّ البدائل هو الصحيح؟

المدى الأفقي للمقذوف

المثال 3-8 المدى الأفقي

(أ) اشتق علاقة تعطي المدى الأفقي R بدلالة السرعة الابتدائية v_0 وزاوية الإطلاق θ_0. يعرف المدى الأفقي بأنه المسافة الأفقية التي يقطعها المقذوف من نقطة إطلاقه حتى نقطة ارتطامه بالأرض. (انظر الشكل 3-25 أ).

(ب) لو افترضنا أنّ سرعة الإطلاق لمدفع نابليون v_0 هي 60.0 m/s. فعلى أيّ زاوية يجب وضع هذا المدفع كي يصيب هدفا على بعد 320 m؟ أهمل مقاومة الهواء.

النّهج: الوضع هنا يشبه الوضع الموجود في (المثال 3-5)، باستثناء أننا سنتعامل هنا مع معادلات من غير أرقام في (أ). سنحلّ بعض المعادلات جبريا للوصول إلى النتائج.

الحلّ: (أ) نعوض $x_0 = 0$ و $y_0 = 0$ عند $t = 0$. عندما يقطع المقذوف المدى الأفقي R، فإنه يعود إلى مستوى الإطلاق $y = 0$ عند النقطة النهائية. نختار الفترة الزمنية بحيث تبدأ من لحظة الإطلاق $(t = 0)$ وتنتهي عندما يعود الجسم إلى مستوى الإطلاق العمودي نفسه. لإيجاد علاقة عامة للمدى الأفقي؛ نعوض $y = 0$ و $y_0 = 0$ في (المعادلة 2-11 ب) للحركة العمودية، فنحصل على

$$y = y_0 + v_{y0}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2$$

$$0 = 0 + v_{y0}t - \tfrac{1}{2}gt^2$$

نحلّ المعادلة لإيجاد t، فنحصل على قيمتين $t = 0$ و $t = 2v_{y0}/g$، الحلّ الأول يعود إلى لحظة الإطلاق، أما الحلّ الثاني فيعطي الزمن عندما يعود المقذوف إلى $y = 0$، وهنا يكون المدى الأفقي R مساويا للمسافة x عند هذا الزمن، وبتعويض هذه القيمة في (المعادلة 2-11 ب) للحركة الأفقية $(x = v_{x0}t, x_0 = 0)$ نحصل على

$$R = x = v_{x0}t = v_{x0}\left(\frac{2v_{y0}}{g}\right) = \frac{2v_{x0}v_{y0}}{g} = \frac{2v_0^2 \sin\theta_0 \cos\theta_0}{g} \qquad [y = y_0]$$

حيث استخدمنا هنا $v_{x0} = v_0 \cos\theta_0$، و $v_{y0} = v_0 \sin\theta_0$ وهذا هو المطلوب. ونستطيع كتابة النتيجة السابقة باستخدام المتطابقة الرياضية $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$ كما يلي:

معادلة المدى الأفقي $[y\ (final) = y_0]$

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}. \qquad [y = y_0]$$

وهنا نرى أنّ أقصى مدى أفقي لسرعة معينة v_0 يعطى عندما $\sin 2\theta = 1.0$، ومن ثَمّ تكون $2\theta_0 = 90°$. وبالتالي، يكون $R_{max} = v_0^2/g)$, $\theta_0 = 45°$ لأقصى مدى أفقي)

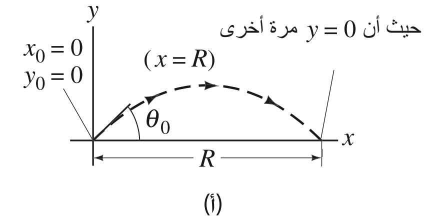
[عندما تأخذ مقاومة الهواء بالحسبان، فإنّ المدى الأفقي يكون أقلّ عند سرعة معينة v_0 وأقصى مدى أفقي يحصل عند زاوية أقلّ من 45°].

ملحوظة: يزداد أقصى مدى أفقي مع مربع السرعة v_0. ومن ثَمّ، فإنّ مضاعفة السرعة يضاعف أقصى مدى أفقي أربع مرات قيمته الأصلية.

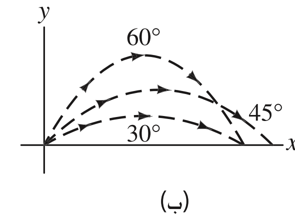
(ب) تعوض $R = 320$ m في المعادلة السابقة، وبإهمال مقاومة الهواء نجد أنه

$$\sin 2\theta_0 = \frac{Rg}{v_0^2} = \frac{(320\,\text{m})(9.80\,\text{m/s}^2)}{(60.0\,\text{m/s})^2} = 0.871$$

والآن، نجد الزاوية θ_0 التي تقع بين 0° و 90°. ومن ثَمّ وباستخدام الآلة الحاسبة تكون $2\theta_0 = 60.6°$ ومكملة هذه الزاوية تعطينا حلّا آخر هو



(أ)



(ب)

الشكل 3-25 المثال 3-8
أ) المدى الأفقي للمقذوف
ب) هنالك بالعادة زاويتا إطلاق θ_0 تعطيان المدى الأفقي نفسه. هل تستطيع أن تبين أنه إذا كانت الزاوية الأولى θ_{01} فإنّ الزاوية الثانية $\theta_{02} = 90° - \theta_{01}$؟

$2\theta_0 = 180° - 60.6° = 119.4°$ (انظر الملحق 7-A) وعلى نحو عام يكون لدينا حلّان (انظر الشكل 3-25 ب) في هذا السؤال، هما:
$\theta_0 = 30.3°$ ، أو $59.7°$
وكلتا الزاويتين تعطيان المدى نفسه. عندما يكون $\sin 2\theta_0 = 1$ (ومن ثَمّ $\theta_0 = 45°$) يكون لدينا زاوية واحدة فقط (أي أنّ الحلّين يكونان متساويين؛ لأنّ الزاوية 45^o متممة لنفسها).

مثال إضافي أكثر تحدّيا ولكنه ممتع

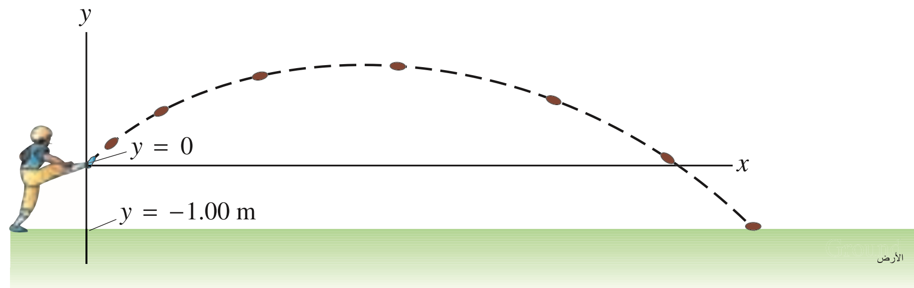
المثال 3-9 **افرض أنّ لاعب كرة القدم في (المثال 3-5) قد ركل الكرة بقدمه** وهي على ارتفاع 1.00 m عن سطح الأرض. ما المسافة الأفقية التي ستقطعها الكرة قبل أن تصطدم بالأرض؟ $x_0 = 0, y_0 = 0$

النهج: سنتعامل مرة أخرى مع كلّ من الحركتين الأفقية والعمودية على نحو منفصل، ولكن هنا لا نستطيع استخدام المعادلة التي أوجدناها في (المثال 3-8) لأنها تطبق فقط عندما تكون $y\,(\text{final}) = y_0$، وهذا لا ينطبق هنا.
هنا لدينا $y_0 = 0$، ولكن الكرة تصطدم بالأرض عند $y = -1.00\,\text{m}$ (انظر الشكل 3-26).
نختار الفترة الزمنية من اللحظة التي تغادر بها الكرة قدم اللاعب $(t = 0, y_0 = 0, x_0 = 0)$ وتنتهي عندما ترتطم الكرة بالأرض $(y = -1.00\,\text{m})$. نستطيع إيجاد x من (المعادلة 2-11 ب)، $x = v_{x0}t$، حيث نعلم أنّ $v_{x0} = 16.0\,\text{m/s}$ من (المثال 3-5). بداية، يجب إيجاد الزمن t اللازم لاصطدام الكرة بالأرض، والذي نستطيع إيجاده من الحركة العمودية (y).

الحل: نعوض $y = -1.00\,\text{m}$، و $v_{y0} = 12.0\,\text{m/s}$ (انظر المثال 3-5) وباستخدام المعادلة
$$y = y_0 + v_{y0}t - \tfrac{1}{2}gt^2$$
نحصل على
$$-1.00\,\text{m} = 0 + (12.0\,\text{m/s})t - (4.90\,\text{m/s}^2)t^2$$
وبإعادة ترتيب هذه المعادلة نحصل على
$$(4.90\,\text{m/s}^2)t^2 - (12.0\,\text{m/s})t - (1.00\,\text{m}) = 0$$
وبحلّ هذه المعادلة التربيعية (انظر الملحق 4-A) نحصل على
$$t = \frac{12.0\,\text{m/s} \pm \sqrt{(12.0\,\text{m/s})^2 - 4(4.90\,\text{m/s}^2)(-1.00\,\text{m})}}{2(4.90\,\text{m/s}^2)}$$
$$= 2.53\,\text{s} \text{ أو } -0.081\,\text{s}$$
والحل السالب يعود إلى الزمن قبل ركل الكرة، ومن ثَمّ فإنه يهمل، ويكون الزمن $t = 2.53\,\text{s}$ هو الزمن اللازم لاصطدام الكرة بالأرض، وتكون المسافة الأفقية التي تقطعها الكرة (استخدم $v_{x0} = 16.0\,\text{m/s}$ من المثال 3-5) تساوي
$$x = v_{x0}t = (16.0\,\text{m/s})(2.53\,\text{s}) = 40.5\,\text{m}$$
أي أنّ افتراضنا في (المثال 3-5) بأنّ الكرة غادرت الأرض من مستوى سطح الأرض قد أعطى فرقا في المسافة الأفقية مقداره 1.3m.

تطبيق الفيزياء في الرياضة

توجيه: حل الأسئلة
لا تستخدم أيّ معادلة إلا إذا كنت متأكدا بأنّ شروط تحقيقها مطبقة في المثال. معادلة المدى الأفقي لا تطبق هنا لأنّ $(y \neq y_0)$.



الشكل 3-26 (المثال 3-9) تغادر الكرة قدم اللاعب عند $y = 0$ وتصطدم بالأرض عند $y = -1.00\,\text{m}$.

* 3-7 مسار حركة المقذوف هي قطع مكافىء

نريد أن نبين هنا بأنّ المسار الذي يتبعه المقذوف هو قطع مكافىء، إذا أهملنا مقاومة الهواء، واعتبرنا تسارع الجاذبية الأرضية $\vec{g}$ مقدارا ثابتا. ولإثبات هذا؛ فإننا نحتاج إلى كتابة y كدالة في x بإزالة الزمن t من خلال معادلات الحركتين الأفقية والعمودية، وبتعويض $x_0 = y_0 = 0$ نحصل على ما يلي:

$$x = v_{x0}t$$
$$y = v_{y0}t - \tfrac{1}{2}gt^2$$

عند تعويض قيمة $t = x/v_{x0}$ من المعادلة الأولى في المعادلة الثانية، نحصل على ما يلي:

$$y = \left(\frac{v_{y0}}{v_{x0}}\right)x - \left(\frac{g}{2v_{x0}^2}\right)x^2$$

وبتعويض $v_{x0} = v_0 \cos\theta_0$ و $v_{y0} = v_0 \sin\theta_0$ نستطيع كتابة

$$y = (\tan\theta_0)x - \left(\frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta_0}\right)x^2$$

وبكل الأحوال، نجد أنّ y كدالة في x تعطى حسب العلاقة

$$y = Ax - Bx^2$$

حيث A، و B ثوابت لأيّ حركة محددة للمقذوف، وهذه هي معادلة القطع المكافئ (انظر الشكلين 3-17 ، 3-27).

وهذه الفكرة كانت أيام جاليليو في طليعة البحث في الفيزياء. أما في الوقت الحاضر، فإنها تناقش في الفصل الثالث في هذا الكتاب الذي يبحث في أساسيات الفيزياء.



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل 3-27 أمثلة على حركة المقذوفات: الشرار الناتج في عملية لحام المعادن، ونوافير المياه، والألعاب النارية كلها تبين أنّ مسار المقذوف هو قطع مكافئ، على الرغم من رؤية تأثير مقاومة الهواء في تغيير مسار بعض المقذوفات.

* 3-8 السرعة النسبية

سنناقش الآن كيفية تغيّر المشاهدات بالنظر إليها من محاور إسناد مختلفة. فمثلا، لو درسنا حركة قطارين يتجاوز أحدهما الآخر، وكلّ منهما يتحرك بعكس الآخر بسرعة 80 km/h بالنسبة إلى الأرض، فإنّ المشاهد الموجود على سطح الأرض سيقيس سرعة 80km/h لكلا القطارين. المشاهد الموجود على أيّ منهما (محوري إسناد مختلفين) سيقيس سرعة 160 km/h للقطار الآخر الذي يتجاوزه.

وبالكيفية نفسها، عندما تتجاوز سيارة سرعتها 90 km/h سيارة أخرى تتحرك بالاتجاه ذاته وبسرعة 75 km/h، فإنّ سرعة السيارة الأولى بالنسبة إلى الأخرى تساوي $90\text{ km/h} - 75\text{ km/h} = 15\text{ km/h}$. وعندما تكون السرعات على الخط نفسه، فإنّ عمليتي الجمع أو الطرح للسرعتين تحدد السرعة النسبية على نحو مبسط، أمّا عندما لا تكون السرعات على الخط ذاته، فعلينا استخدام عملية جمع المتجهات.

أكدنا سابقا في (البند 2-1) أنّ من المهم لإيجاد السرعة تحديد محور إسنادها (إطارها المرجعي). عند تحديد السرعة النسبية، قد نخطئ عن طريق إضافة السرعات أو جمعها على نحو خطأ. لذلك، فإنّ من الضروري رسم مخطط، واستخدام طرائق تمييز دقيقة للسرعات. كلّ سرعة تحدد برمزين صغيرين (subscripts) أحدهما يعود إلى الجسم نفسه، والآخر يعود إلى محور الإسناد الذي تقاس السرعة بالنسبة إليه. فمثلا، لو كان لدينا قارب يريد أن يقطع النهر إلى الجهة المقابلة، كما هو واضح في (الشكل 3-28)، فإننا نضع $\vec{v}_{BW}$ لتمثل سرعة القارب بالنسبة إلى الماء (تساوي سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر لو كان الماء راكدا) وكذلك $\vec{v}_{BS}$ تمثل سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر، أمّا $\vec{v}_{WS}$ فتمثل سرعة الماء بالنسبة إلى ضفة النهر (سرعة تيار الماء). لاحظ أنّ $\vec{v}_{BW}$ تنتج من محرك القارب (ضد ماء النهر)، في حين $\vec{v}_{BW}$ تساوي $\vec{v}_{BW}$ مضافًا إليها سرعة تيار الماء. ومن ثَمّ تكون سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر تساوي $\vec{v}_{WS}$

توجيه لحلّ الأسئلة.

تستخدم الرموز الصغيرة لتحديد السرعات؛ فالأول يعود إلى الجسم، والآخر إلى محور الإسناد.

(انظر مخطط السرعة، الشكل *28-3*)

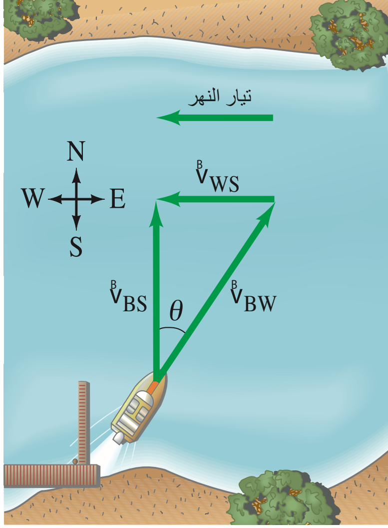
$$\vec{v}_{BS} = \vec{v}_{BW} + \vec{v}_{WS} \quad \textbf{(6-3)}$$

تابع الرموز المنخفضة

بكتابة الرموز الصغيرة كالعادة، فإننا نرى أنّ الرمزين الصغيرين الداخليين (حرفا W) في الجهة اليمنى من (المعادلة 6-3) هما الشيء نفسه، وكذلك فإنّ الرمزين الخارجيين (S ، B) هما ذاتهما الموجودان في $\vec{v}_{BS}$ على يسار المعادلة، وباتباع هذا الاصطلاح (الحرف الصغير الأول للجسم، والآخر لمحور الإسناد)، فإننا نستطيع كتابة معادلة صحيحة تربط السُّرع المقيسة بالنسبة إلى محاور إسناد مختلفة. (المعادلة 6-3) تطبق على نحو عام، ويمكن أن تطبق على ثلاث سرعات أو أكثر*. فعلى سبيل المثال، لو مشى صياد سمك داخل القارب بسرعة $\vec{v}_{FB}$ بالنسبة إلى القارب، فإنّ سرعته بالنسبة إلى ضفة النهر $\vec{v}_{FS} = \vec{v}_{FB} + \vec{v}_{BW} + \vec{v}_{WS}$. وتكون المعادلات التي تحوي السرع النسبية صحيحة عندما تكون الرموز الصغيرة الداخلية متشابهة، وتكون الرموز الخارجية هي التي توضع مع السرعة على يسار المعادلة، مع الأخذ بالحسبان أنّ العمليات على يمين المعادلات هي عمليات جمع وليست عمليات طرح. ومن المفيد عادة أن نتذكر أنه لأيّ جسمين أو محوري إسناد، A و B فإنّ سرعة A بالنسبة إلى B لها المقدار نفسه، ولكنها معاكسة لاتجاه سرعة B بالنسبة إلى A:

$$\vec{v}_{BA} = -\vec{v}_{AB} \quad \textbf{(7 - 3)}$$

وعلى سبيل المثال، إذا سار قطار بسرعة 100 km/h بالنسبة إلى الأرض باتجاه معين، فإنّ أيّ جسم على سطح الأرض (شجرة مثلا) يبدو بالنسبة إلى مراقب على القطار يتحرك بسرعة مقدارها 100 km/h بالاتجاه المعاكس.



الشكل 28-3 لقطع النهر مباشرة إلى الجهة المقابلة؛ يجب أن يتحرك القارب بزاوية مقدارها θ ضد تيار النهر. علمًا آن متجهات السرعة قد كتبت باسهم خضراء اللون.

$\vec{v}_{BS}$ = سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.

$\vec{v}_{BW}$ = سرعة القارب بالنسبة إلى الماء

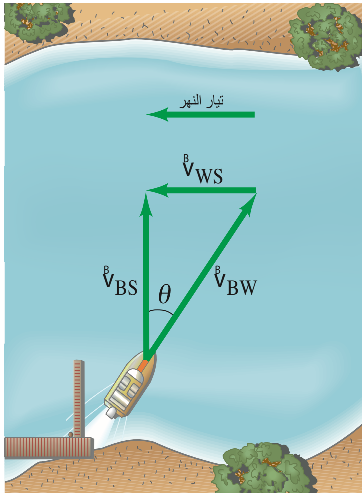
$\vec{v}_{WS}$ = سرعة تيار الماء بالنسبة إلى ضفة النهر.

المثال المفاهيمي 10-3 قطع النهر

قطع النهر . يود رجل يركب قاربًا بمحرك صغير أن يجتاز نهرا يتحرك تياره بشدة نحو الغرب. إذا بدأ الرجل من الضفة الجنوبية، ويريد أن يقطع النهر إلى الضفة الشمالية مباشرة، فماذا عليه أن يفعل؟ هل سيتحرك باتجاه (أ) الشمال؟ أم (ب) الغرب؟ أم (جـ) الشمال الغربي؟ أم (د) الشمال الشرقي؟

الإجابة: إذا تحرك الرجل على نحو مستقيم، فإنّ تيار النهر سيدفع القارب باتجاه الغرب، ومن ثَمّ سيكون هنالك مركبتان لسرعة القارب: إحداهما إلى الشمال (ناتجة من محرك القارب) والأخرى إلى الغرب (ناتجة من تيار النهر)، ومن ثَمّ سيتحرك القارب باتجاه الشمال الغربي، ولن يصل إلى النقطة المقابلة مباشرة. ولذلك، فإنّ القارب يجب أن يتحرك باتجاه الشمال الشرقي (د) (انظر الشكل 28-3). الزاوية مع الشمال الشرقي تعتمد على شدة تيار النهر؛ أي على السرعة النسبية للقارب بالنسبة إلى الماء. وإذا كان تيار النهر ضعيفا ومحرك القارب قويا، فإنّ القارب يستطيع أن يتحرك تقريبا إلى الشمال مباشرة.

المثال 11-3 التحرك ضد التيار.



الشكل 29-3 (المثال 11-3)

سرعة قارب في المياه الساكنة هي $v_{BW} = 1.85\ \text{m/s}$. فإذا تحرك القارب مباشرة باتجاه عرض النهر الذي يتحرك تياره بسرعة $v_{WS} = 1.20\ \text{m/s}$، فعلى أيّ زاوية مع عرض النهر يجب أن يتحرك القارب ليصل مباشرة إلى الجهة المقابلة؟ (انظر الشكل 29-3).

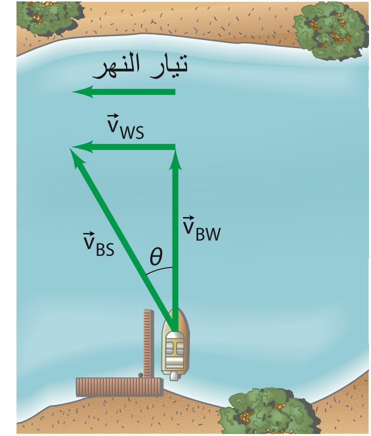
النّهج: نفكر كما في (المثال 10-3)، ونستخدم الحروف الصغيرة كما في (المعادلة 6-3)؛ حيث $\vec{v}_{BS}$ هي سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر، أمّا $\vec{v}_{BW}$ فهي سرعة القارب بالنسبة إلى ماء النهر، في حين $\vec{v}_{WS}$ هي سرعة تيار الماء في النهر ($\vec{v}_{BS} = \vec{v}_{BW} + \vec{v}_{WS}$). ولتحقيق ذلك: يجب أن يتحرك القارب ضد تيار الماء الذي يحاول سحبه باتجاه جريان الماء.

الحل: يجب أن يتحرك القارب بسرعة $\vec{v}_{BW}$، وبزاوية θ كما هو مبين في (الشكل 29-3). ومن هذا الرسم يكون

$$\sin\theta = \frac{v_{WS}}{v_{BW}} = \frac{1.20\ \text{m/s}}{1.85\ \text{m/s}} = 0.6486$$

ومن ثَمّ تكون $\theta = 40.4°$. لذا، فإنّ القارب يجب أن يتحرك بزاوية $40.4°$ ضد تيار النهر.

* وبالتدقيق، في المعادلة $\vec{v}_{BW} = \vec{v}_{BS} + \vec{v}_{WS}$ نجد أنها غير صحيحة، وذلك لأن الرموز السفلية الداخلية ليست متساوية وكذلك في الرموز السفلية الخارجية إلى جهة اليمين ليست نفسها كما على جهة اليسار.



الشكل 3-30 المثال 3-12 قارب يقطع نهرًا سرعة تياره 1.20 m/s مباشرة.

المثال 3-12 التحرك مباشرة عبر عرض النهر

يقطع القارب نفسه في المثال السابق $(v_{BW} = 1.85\ \text{m/s})$ مباشرة النهر الذي سرعة تياره 1.20 m/s.

(أ) ما سرعة القارب (مقدارًا واتجاهًا) بالنسبة إلى ضفة النهر؟

(ب) إذا كان عرض النهر 110 m، فما الزمن الذي سيستغرقه القارب لقطع النهر؟ وما المسافة التي سيتحركها القارب بعيدًا عن الجهة المقابلة؟

النّهج: يقطع القارب الآن النهر على نحو مباشر، ومن ثَمّ فإنه سيُدفع من تيار النهر إلى الغرب كما هو موضح في الشكل 3-30. سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر $\vec{v}_{BS}$ هي عبارة عن مجموع سرعة القارب بالنسبة إلى الماء $\vec{v}_{BW}$، وسرعة تيار الماء بالنسبة إلى ضفة النهر $\vec{v}_{WS}$

$$\vec{v}_{BS} = \vec{v}_{BW} + \vec{v}_{WS}$$

كما مر معنا سابقا.

الحل:

(أ) حيث إنّ عمودية $\vec{v}_{BW}$ على $\vec{v}_{WS}$، فإننا نستطيع إيجاد v_{BS} باستخدام نظرية فيثاغورس

$$v_{BS} = \sqrt{v_{BW}^2 + v_{WS}^2} = \sqrt{(1.85\ \text{m/s})^2 + (1.20\ \text{m/s})^2} = 2.21\ \text{m/s}$$

نستطيع إيجاد الزاوية θ (المعرّفة بالرسم) من العلاقة

$$\tan\theta = v_{WS}/v_{BW} = (1.20\ \text{m/s})/(1.85\ \text{m/s}) = 0.6486$$

الآلات الحاسبة التي تحتوي على INV TAN، أو ARC TAN أو TAN^{-1} تعطينا $\theta = \tan^{-1}(0.6486) = 33.0°$. لاحظ أنّ هذه الزاوية لا تساوي الزاوية التي حسبت في (المثال 3-11).

(ب) الزمن اللازم لقطع النهر يمكن حسابه من العلاقة $v_{BW} = D/t$، حيث $D = 110\ \text{m}$ هي عرض النهر؛ أي أنّ $t = 110\ \text{m}/1.85\ \text{m/s} = 60\ \text{s}$ والمسافة التي يتحركها القارب بعيدًا عن الجهة المقابلة

$$d = v_{WS}t = (1.20\ \text{m/s})(60\ \text{s}) = 72\ \text{m}$$

ملحوظة: لا يوجد تسارع في هذا السؤال؛ حيث إنّ الحركة تشتمل على سرعات ثابتة (لكلّ من القارب والنهر).

ملخص

الكمية (مثل السرعة) التي تحدد بالمقدار والاتجاه تُسمَّى كمية **متجهة** (vector)، أمّا الكمية (مثل الكتلة) التي تحدد بالمقدار فقط فتسمى كمية قياسية (scalar). جمع المتجهات بطريقة الرسم يكون بوضع ذيل كلّ سهم يمثل متجهًا على رأس المتجه الذي يسبقه. وتستطيع جمع متجهين أيضًا بطريقة متوازي المستطيلات. تستطيع جمع المتجهات بطريقة أكثر دقة عن طريق جمع مركبات المتجهات باتجاه محور معين وبمساعدة الدوال المثلثية.

المتجه الذي مقداره V ويصنع زاوية θ مع محور السينات الموجب يكون له المركبتان التاليتان:

$$V_x = V\cos\theta, \qquad V_y = V\sin\theta \tag{3-3}$$

إذا حصلنا على المركبتين، فإننا نستطيع إيجاد مقدار المتجه واتجاهه كما يلي:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \qquad \tan\theta = \frac{V_y}{V_x} \tag{4-3}$$

حركة المقذوف: هي حركة جسم بشكل قوسي بالقرب من سطح الأرض تحت تأثير مجال الجاذبية الأرضية فقط. نستطيع تحليل هذه الحركة إلى حركتين منفصلتين إذا أهملنا مقاومة الهواء. تكون المركبة الأفقية لحركة المقذوف بسرعة ثابتة، ولكن المركبة العمودية تكون بتسارع ثابت $\vec{g}$، تماما مثل الجسم الساقط سقوطا حرًا تحت تأثير الجاذبية الأرضية.

[*نستطيع إيجاد السرعة لجسم ما بالنسبة إلى أحد محاور الإسناد من الجمع الاتجاهي إذا عرفنا سرعته بالنسبة إلى محور إسناد ثانٍ و**السرعة النسبية** لمحوري الإسناد].

أسئلة

1. تسير سيارة بسرعة 40 km/h إلى الشرق، في حين تسير أخرى بسرعة 40 km/h إلى الشمال. هل سرعتاهما متساويتان؟ فسر ذلك.

2. هل تستطيع أن تعطي أمثلة عديدة لحركة جسم يقطع مسافة كبيرة، ولكن إزاحته تساوي صفرا؟

3. هل من الممكن أن يكون متجه الإزاحة لجسم يتحرك في بعدين أكبر من المسار الذي يقطعه في الفترة الزمنية نفسها؟ هل يمكن أن يكون أقلّ؟ ناقش ذلك.

4. في لعبة البيسبول، يضرب اللاعب الكرة ثم يجري بخط مستقيم ليلتقطها. أيهما له إزاحة أكبر: اللاعب أم الكرة؟

5. إذا كانت $\vec{\mathbf{V}} = \vec{\mathbf{V}}_1 + \vec{\mathbf{V}}_2$ فهل من الضروري أن يكون مقدار V_1 أكبر من مقدار أحدهما أو كلاهما؟ ناقش ذلك.

6. متجهان: طول الأول $V_1 = 3.5\ \text{km}$، وطول الآخر $V_2 = 4.0\ \text{km}$. ما أكبر وأقلّ مقدار لحاصل جمع هذين المتجهين؟

7. هل من الممكن أن تكون محصلة متجهين غير متساويين مساوية للصفر؟ وهل من الممكن أن تكون محصلة ثلاثة متجهات غير متساوية مساوية للصفر؟ ما شروط ذلك؟

8. (أ) هل يمكن أن يكون مقدار أحد المتجهات مساويا لإحدى مركباته؟ (ب) هل يمكن أن يكون مقدار أحد المتجهات أقلّ من إحدى مركباته؟

9. هل يمكن أن يتسارع جسم يتحرك بسرعة ثابتة بالمقدار؟ وهل يمكن أن يتسارع جسم يتحرك بسرعة ثابتة بالمقدار والاتجاه؟

10. يريد طفل تحديد السرعة التي يمنحها مقلاع لحجر. كيف يمكن عمل ذلك باستعمال مسطرة مترية، وحجر، ومقلاع؟

11. ذُكر في الحرب العالمية الأولى أنّ طيارا يقود طائرته على ارتفاع 2 km قد أمسك بيديه رصاصة أطلقت على الطائرة. استخدم حقيقة أنّ سرعة الرصاصة تقلّ بسبب مقاومة الهواء لتفسير ما حدث.

12. في بعض مدن الألعاب الترفيهية، ولجعل العربة تتحرك: يقفز الركاب أولا على المجرى الذي تتحرك عليه العربة، ثم يقفزون إلى العربة نفسها. لماذا يفعلون ذلك؟

13. إذا تجاوز القطار الذي تركبه قطارا آخر يتحرك بالاتجاه نفسه، فستلاحظ أنّ القطار الآخر يبدو كأنه يتحرك إلى الخلف. لماذا؟

14. إذا وقفت تحت مظلة في يوم ماطر، فإنك تبقى جافا؛ لأنّ المطر يسقط عموديّا، ولكن إذا بدأت بالركض، فإنّ المطر يبدأ بضرب رجليك حتى لو بقيت تحت المظلة، لماذا؟

15. يجلس شخص في عربة قطار مغلقة تتحرك بسرعة ثابتة. إذا قذفت كرة نحو الأعلى بالنسبة إلى محاور إسناده (أ) فأين ستسقط الكرة؟ ماذا ستكون إجابتك إذا: (ب) تسارعت العربة؟ (جـ) تباطأت العربة؟ (د) تحركت العربة بمنحنى؟ (هـ) تحركت العربة بسرعة ثابتة ولكنها فتحت على الهواء؟

16. يجذّف شخصان بالسرعة نفسها للوصول إلى الضفة المقابلة للنهر، فإذا تحركا في الوقت ذاته، بحيث تحرك الأول مباشرة إلى الجهة المقابلة، في حين تحرك الثاني بزاوية مع عرض النهر. فأيهما سيصل إلى الضفة المقابلة أولا؟

17. باعتقادك، كيف يتحكم لاعب البيسبول في طيران الكرة، أيّ علاقة من علاقات الفصل تصبح جزءًا لا يتجزأ من حدس اللاعب؟

18. في لعبة رمي السهام، هل يوجه السهم مباشرة إلى الهدف؟ كيف تعتمد زاوية التسديد على بُعد الهدف؟

19. أطلقت قذيفة بزاوية $30°$ مع الأفقي وبسرعة مقدارها $30\ \text{m/s}$. قارن بين المركبتين الأفقيتين للسرعة بعد $1.0\ \text{s}$ و $2.0\ \text{s}$ من الإطلاق.

20. قذيفتا مدفع B، و A أطلقتا من سطح الأرض بالسرعة الابتدائية نفسها، ولكن بزاوية θ_A أكبر من θ_B.

(أ) أيهما تصل إلى ارتفاع أعلى؟

(ب) أيهما تمكث في الهواء فترة أطول؟

(جـ) أيهما تقطع مسافة أفقية أكبر؟

مسائل

1. تتحرك سيارة 215 km إلى الشرق، ثم 85 km إلى الشمال الشرقي. ما إزاحة هذه السيارة من نقطة البداية (بالمقدار والاتجاه)؟ ارسم مخططًا.

2. (I) تتحرك سيارة 18 وحدة طول إلى الشمال و10 وحدات إلى الشرق، ثم 16 وحدة إلى الجنوب. ما الإزاحة الكلية من نقطة البداية؟

3. (I) أثبت أنّ المتجه المكتوب عليه (غير صحيح) في (الشكل 3-6 جـ) هو في الواقع الفرق بين المتجهين. هل هو $\vec{\mathbf{V}}_2 - \vec{\mathbf{V}}_1$ أم $\vec{\mathbf{V}}_1 - \vec{\mathbf{V}}_2$؟

4. (I) إذا كان $V_x = 6.80$ وحدة و $V_y = -7.40$ وحدة، فاحسب مقدار $\vec{\mathbf{V}}$.

5. (II) باستخدام طريقة الرسم، أوجد محصلة المتجهات الثلاثة التالية:

(1) 34 m باتجاه $25°$ شمال شرق.

(2) 48 m باتجاه $33°$ شمال شرق.

(3) 22 m باتجاه $56°$ شمال غرب.

6. (II) مركبات المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ يمكن كتابتها كما يلي: (V_x, V_y, V_z). ما مركبات المتجه الناتج من جمع المتجهين $\vec{\mathbf{V}}_1$، و$\vec{\mathbf{V}}_2$ وطوله إذا كانت مركباتهما $(8.0, -3.7, 0.0)$ و $(3.9, -8.1, -4.4)$؟

7. (II) مقدار المتجه $\vec{\mathbf{V}}$ هو 14.3 وحدة، ويصنع زاوية $34.8°$ فوق محور السينات السالب.

(أ) ارسم هذا المتجه.

(ب) أوجد V_x، و V_y.

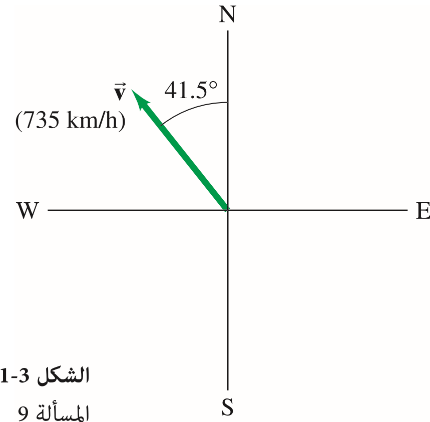
(جـ) استخدم V_x، و V_y لإيجاد (مرة أخرى) مقداره واتجاهه. [الفرع (جـ) هو طريقة جيدة للتأكد من صحة تحليل المتجه إلى مركباته].

8. (II) مقدار المتجه $\vec{\mathbf{V}}_1$ هو 6.6 وحدة باتجاه محور السينات السالب، ومقدار المتجه $\vec{\mathbf{V}}_2$ هو8.5 وحدة باتجاه يصنع زاوية $+45°$ مع محور السينات الموجب.

(أ) ما المركبات السينية (x) والصادية (y) لكلا المتجهين؟

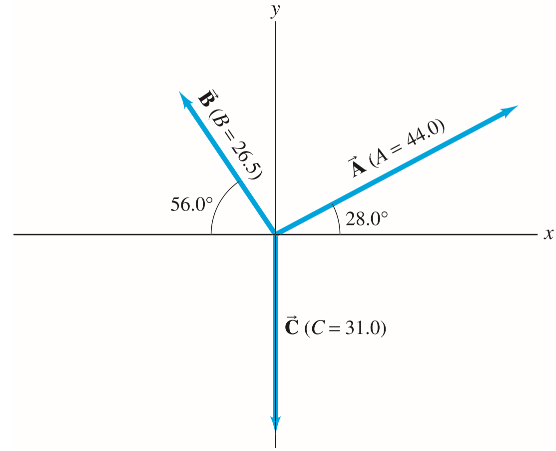
(ب) أوجد $\vec{\mathbf{V}}_1 + \vec{\mathbf{V}}_2$ (عن طريق إيجاد المقدار والزاوية).

9. (II) طائرة تطير بسرعة 735 km/h بزاوية 41.5° باتجاه الشمال الغربي (الشكل 3-31) (أ) أوجد مركبات متجه السرعة باتجاهي الشمال والغرب. (ب) كم المسافة التي ستقطعها الطائرة باتجاهي الشمال والغرب بعد ثلاث ساعات (3.00 h)؟



الشكل 3-31
المسألة 9

10. (II) لديك ثلاثة متجهات في (الشكل 3-32). إذا كانت المقادير معطاة بوحدات اختيارية، فأوجد المحصلة بدلالة: (أ) المركبات. (ب) المقدار والزاوية مع محور السينات (x-axis).



الشكل **3-32** المسائل 10، و 11، و 12، و 13، و14. مقادير المتجهات معطاة بوحدات اختيارية.

11. (II) من (الشكل 3-32)، أوجد المتجه $\vec{A} - \vec{C}$.

12. (II) (أ) من (الشكل 3-32)، أوجد $\vec{B} - \vec{A}$. (ب) أوجد $\vec{A} - \vec{B}$ دون استخدام الإجابة في الفرع (أ). ثم قارن الإجابتين، وبين أنهما متعاكستان في الاتجاه.

13. (II) من (الشكل 3-32) أوجد:
(أ) $\vec{A} - \vec{B} + \vec{C}$. (ب) $\vec{A} + \vec{B} - \vec{C}$. (جـ) $\vec{C} - \vec{A} - \vec{B}$.

14. (II) من (الشكل 3-32)، أوجد ما يلي:
(أ) $\vec{B} - 2\vec{A}$. (ب) $2\vec{A} - 3\vec{B} + 2\vec{C}$.

15. (II) جبل ارتفاعه 2450 m، قيست المسافة المباشرة بين مخيم كشفي يقع في السهل المجاور للجبل، وقمة الجبل فكانت 4580 m، وتصنع زاوية 32.4° مع الشمال الغربي. ما مركبات متجه الإزاحة الذي يبدأ من المخيم وينتهي بقمة الجبل؟

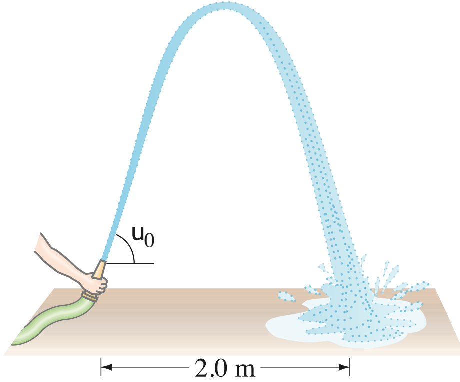
16. (II) لديك متجه في المستوى السيني الصادي xy مقداره 70.0 وحدة، ومركبته باتجاه المحور الصادي −55.0 وحدة. ما الاحتمالان المتوقعان للمركبة السينية؟

3-5 و 3-6 حركة المقذوفات (مع إهمال مقاومة الهواء).

17. (I) يقفز نمر أفقيا من صخرة ارتفاعها 6.5 m بسرعة 3.5 m/s. كم المسافة الأفقية التي يقطعها من قاعدة الصخرة؟

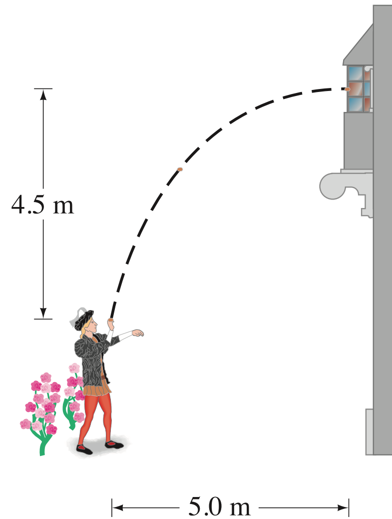
18. (I) يجري غطاس بسرعة 1.8 m/s على حافة تلة، ثم يقفز إلى الماء. إذا وصل الماء بعد 3.0 s (ثلاث ثوان). فما ارتفاع التلة؟ وما بُعد النقطة التي يهبط فيها على سطح الماء عن حافة التلة؟

19. (II) ينطلق الماء من خرطوم مياه بسرعة 6.8 m/s. ما الزاوية (أو الزوايا) التي يجب أن يوضع عليها الخرطوم حتى يصطدم الماء على بعد 2.0 m من نقطة الإطلاق؟ (الشكل 3-33) ؟ لماذا يكون لدينا زاويتان؟ ارسم مسار الماء في الحالتين.



الشكل **3-33** المسألة 19

20. (II) رمى روميو حصاة باتجاه نافذة جوليت، بحيث تصيب الحصاة النافذة بسرعة أفقية فقط. إذا كان روميو يقف على مسافة 5.0 m من قاعدة الجدار، وكان ارتفاع النافذة عن يده 4.5 m (الشكل 3-34) فما سرعة الحصاة عندما تصطدم بالنافذة؟



الشكل **3-34**
المسألة 20

21. (II) تقذف كرة أفقيا من سطح عمارة ارتفاعها 45.0 m فتستقر على مسافة 24.0 m من قاعدتها. ما السرعة الابتدائية للكرة؟

22. (II) يضرب لاعب الكرة من سطح الأرض بسرعة 18.0 m/s وبزاوية 35.0° عن الأفقي. ما الزمن اللازم لاصطدام الكرة بالأرض؟

23. (II) تقذف كرة أفقيا بسرعة 22.2 m/s من سطح عمارة. إذا استقرت الكرة على مسافة 36.0 m من قاعدة العمارة، فما ارتفاع العمارة؟

24. (II) يقفز لاعب أولمبي في القفز الطويل ويغادر سطح الأرض بزاوية $28.0°$ فيقطع مسافة $7.80\ m$. (أ) ما سرعة انطلاقه؟ (ب) إذا زادت سرعته بنسبة 5.0%، فكم ستصبح المسافة التي يقفزها؟

25. (II) احسب كم ستزداد المسافة التي يقفزها شخص ما على سطح القمر مقارنة بالمسافة على سطح الأرض إذا انطلق بالسرعة نفسها وبالزاوية ذاتها. تسارع جاذبية القمر يساوي سدس تسارع جاذبية الأرض.

26. (II) يطلق صياد النار على هدف (بالمستوى نفسه) يبعد مسافة $75.0\ m$ عنه. إذا أطلقت الرصاصة بسرعة $180\ m/s$، فما الزاوية التي يجب أن تطلق بها حتى تصيب الهدف؟

27. (II) يريد قائد طائرة تتحرك بسرعة $180\ km/h$ أن يسقط إمدادات إلى ضحايا طوفان على بقعة أرض تقع على بعد $160\ m$ أسفل الطائرة. قبل كم ثانية يجب إسقاط الإمدادات حتى تصل مباشرة إلى الضحايا؟

28. (II) أثبت أنّ مقدار السرعة التي ينطلق بها المقذوف من سطح الأرض يساوي مقدار السرعة التي يصطدم بها المقذوف بسطح الأرض في نهاية فترة التحليق.

29. (II) لو فرضنا أنّ الكرة في (المثال 3-5) قذفت مباشرة باتجاه مرمى يبعد $36.0\ m$ وترتفع عارضته $3.00\ m$ عن الأرض، فهل ستسجل هدفا؟

30. (II) إذا أُطلقت قذيفة من سطح أرض أفقية بسرعة $65.2\ m/s$ وبزاوية $34.5°$ عن الأفقي، فاحسب: (أ) أقصى ارتفاع للقذيفة. (ب) زمن التحليق الكلي. (جـ) المدى الأفقي. (د) سرعة القذيفة بعد $1.50\ s$ من إطلاقها.

31. (II) إذا أُطلقت قذيفة من حافة تلة ارتفاعها $125\ m$ بسرعة $65.0\ m/s$ وبزاوية $37.0°$ مع المدى الأفقي كما هو مبين في (الشكل 3-35)، فاحسب:

(أ) الزمن اللازم لاصطدام القذيفة بالنقطة P على سطح الأرض.

(ب) المدى الأفقي X للقذيفة من قاعدة التلة.

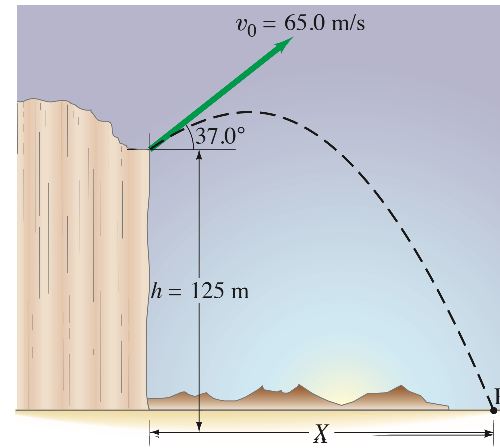
(جـ) مقدار السرعة عند النقطة P.

(د) أقصى ارتفاع عن التلة تصله القذيفة.

وأوجد كلّا من:

(أ) المركبتين السينية والصادية للسرعة عند النقطة P.

(ب) زاوية السرعة عند النقطة P مع المدى الأفقي.

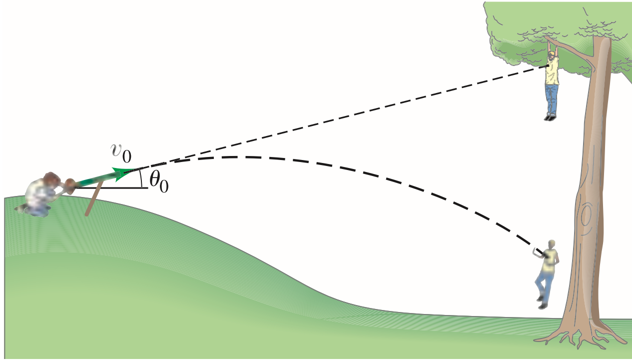


الشكل **3-35** المسألة 31

32. (II) يرمي لاعب أولمبي الكرة الحديدية (الجُلّة) بسرعة $15.5\ m/s$ وبزاوية $34.0°$ مع المدى الأفقي. احسب المسافة الأفقية التي تقطعها الكرة إذا انطلقت من يد اللاعب على ارتفاع $2.20\ m$ عن سطح الأرض.

33. (II) على أيّ زاوية إطلاق يكون مدى القذيفة مساويا لأقصى ارتفاع لها؟

34. (II) ارجع إلى (المثال المفاهيمي 3-7). لو فرضنا أنّ صبيّ المقلاع يقع على مستوى تحت مستوى الصبي المعلق على الشجرة (الشكل 3-36) ويوجه القذيفة مباشرة باتجاهه. أثبت مرة أخرى أنّ الصبي المعلق بالشجرة يرتكب الخطأ نفسه عندما يسقط إلى الأسفل لحظة إطلاق البالون المائي.



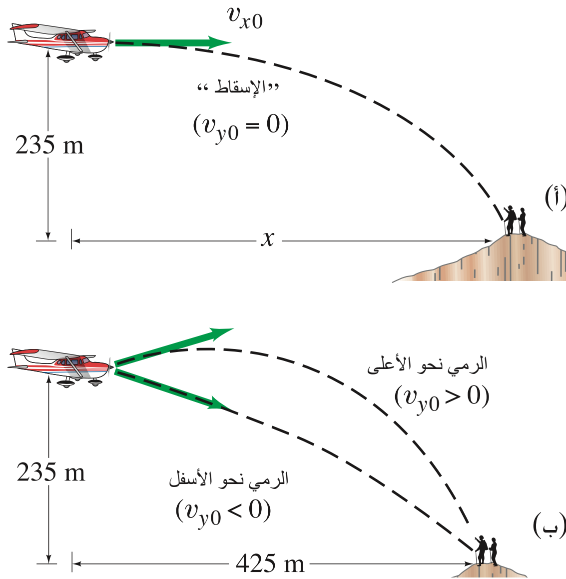
الشكل **3-36** المسألة 34.

35. (III) تريد طائرة إنقاذ أن تسقط إمدادات إلى متسلقي جبال محصورين بين جبال صخرية تقع على مسافة $235\ m$ تحت الطائرة. إذا تحركت الطائرة بسرعة $250\ km/h\ (69.4\ m/s)$.

(أ) ما المسافة الأفقية (x) عن المتسلقين التي ستسقط عندها الطائرة البضائع (الشكل 3-37أ)؟

(ب) إذا فرضنا أنّ المسافة الأفقية عن المتسلقين، التي ستسقط عندها الطائرة البضائع هي $425\ m$، فما السرعة العمودية (فوق أو تحت) التي يجب إعطاؤها للإمدادات حتى تصل بدقة إلى متسلقي الجبال (الشكل 37.3 ب)؟

(جـ) ما مقدار السرعة التي ستسقط بها الإمدادات في الحالة الثانية؟



الشكل **3-37** المسألة 35

* 3-8 السرعة النسبية

* **36.** (I) يمشي شخص على ظهر سفينة باتجاه مقدمتها بسرعة 2.2 m/s. إذا كانت السفينة تتحرك بسرعة 7.5 m/s، فما سرعة الشخص بالنسبة إلى الماء؟ إذا تحرك الشخص إلى مؤخرة السفينة، فما سرعته بالنسبة إلى الماء في هذه الحالة ؟

* **37.** (II) يتحرك صبي على طوافة خشبية بسرعة 0.60 m/s باتجاه عمودي على اتجاه تيار النهر الذي يتحرك بسرعة 1.70 m/s (الشكل 3-38). ما سرعة الصبي بالنسبة إلى ضفة النهر.



الشكل **3-38** المسألة 37

* **38.** (II) إذا كنت تقود سيارتك باتجاه الجنوب على طريق سريع بسرعة 25 m/s في يوم ثلجي عاصف. عندما تتوقف، تلاحظ أنّ الثلج يسقط عموديًا على السيارة، وعندما تتحرك، يسقط الثلج على الشباك بزاوية 30° عن المدى الأفقي. احسب سرعة سقوط الثلج بالنسبة إلى كلّ من السيارة والأرض.

* **39.** (II) يستطيع قارب أن يتحرك بسرعة 2.30 m/s في الماء الراكد. (أ) إذا تحركت دفة القارب مباشرة باتجاه عرض النهر الذي يتحرك تياره بسرعة 1.20 m/s، فما سرعة القارب (بالمقدار والاتجاه) بالنسبة إلى ضفة النهر؟ (ب) ما موقع القارب بالنسبة إلى نقطة انطلاقه بعد ثلاث ثوانٍ (3.00 s) (انظر الشكل 3-30).

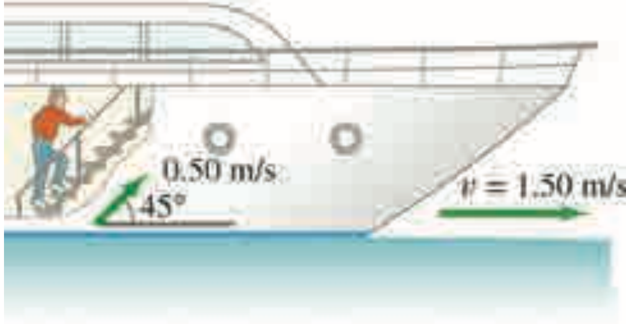
* **40.** (II) طائرتان تتحركان وجهًا لوجه باتجاه بعضهما بعضًا. إذا كانت سرعة كلّ منهما 785 km/h، ورصدت كلّ منهما الأخرى وهما على مسافة 11.0 km عن بعضهما بعضًا. فما الزمن الذي يحتاج إليه الطياران لتجنب اصطدام الطائرتين؟

* **41.** (II) تطير طائرة إلى الجنوب بسرعة 600 km/h. إذا بدأت رياح عاصفة التحرّك باتجاه الجنوب الغربي بسرعة 100 km/h (في المتوسط) فاحسب: (أ) سرعة الطائرة (مقدارا واتجاها) بالنسبة إلى الأرض. (ب) المسافة التي ستقطعها الطائرة بعد عشر دقائق (10 min)، على اعتبار أنّ الطيار لم يعدّل سير الطائرة. [ملحوظة: ارسم مخططًا للمسألة].

* **42.** (II) بأيّ اتجاه يجب أن يوجه الطيار في المسألة 41 طائرته حتى تتحرك باتجاه الجنوب؟

* **43.** (II) احسب مقدار سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر في (المثال 3-11).

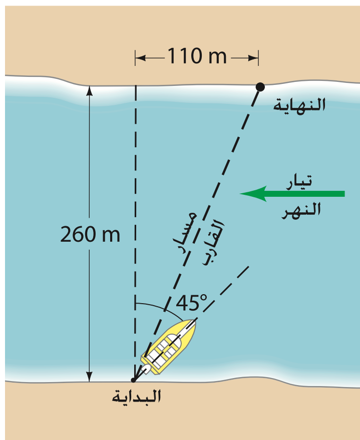
* **44.** (II) يتحرك مسافر على درجات سلم في قارب بسرعة 0.50m/s (الشكل 3-39). إذا كان القارب يتحرك بسرعة 1.50 m/s وكان السلم يميل بزاوية 45° مع اتجاه الحركة، فاحسب سرعة المسافر بالنسبة إلى الماء.



الشكل **3-39** المسألة 44

* **45.** يتحرك قارب ذو محرك بسرعة 2.60 m/s في الماء الراكد. إذا احتاج إلى التحرّك بزاوية 28.5° (مع الخط العمودي على ضفة النهر) حتى يصل إلى النقطة المقابلة مباشرة، فما: (أ) سرعة تيار النهر. (ب) محصلة سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر (الشكل 3-28)؟

* **46.** (II) قارب سرعته في الماء الراكد 1.70 m/s يريد قطع نهر عرضه 260-m. إذا أراد الوصول إلى نقطة تبعد مسافة 110 m عن النقطة المقابلة له مباشرة (الشكل 3-40)، فإنّ القائد يوجهه بزاوية 45° (مع الخط العمودي على ضفة النهر). ما مقدار سرعة تيار النهر؟



الشكل **3-40** المسألة 46

* **47.** (II) يستطيع سبّاح السباحة بسرعة 0.45 m/s في المياه الراكدة. (أ) إذا قطع نهرا عرضه 75-m وسرعة تياره 0.40 m/s، فما بُعد النقطة التي سيصلها عن النقطة المقابلة لنقطة انطلاقه مباشرة؟ (ب) كم الوقت الذي سيستغرقه في قطع النهر إلى الضفة الأخرى؟

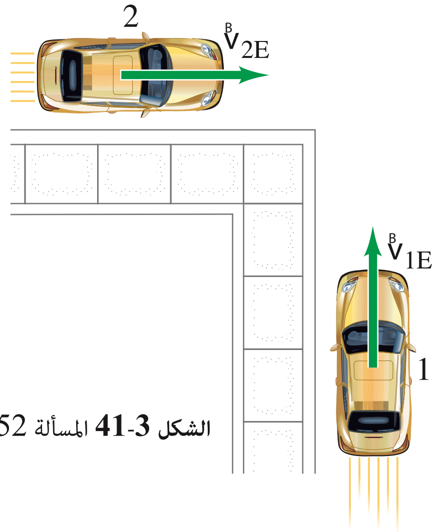
* **48.** (II) (أ) على أيّ زاوية (مع الخط العمودي على ضفة النهر) يجب على السباح في مسألة 47 أن يتحرك ليصل مباشرة إلى النقطة المقابلة؟ (ب) كم الوقت الذي سيستغرقه في هذه الحالة؟

* **.49** (III) طائرة سرعتها 620 km/h من المفترض أن تطير مباشرة بزاوية °35.0 مع الشمال الشرقي ولكن رياحًا عاصفة هبت من الشمال بسرعة 95 km/h أثرت فيها. إلى أيّ اتجاه يجب أن تتوجه الطائرة؟

* **.50** (III) تتحرك سيارة شرطة بسرعة 95 km/h تجاوزتها سيارة أخرى تتحرك بسرعة 145 k/h. بعد ثانية واحدة تماما، بدأت سيارة الشرطة بالتسارع بمعدل $2.00\ m/s^2$. كم الوقت الذي تحتاج إليه سيارة الشرطة للحاق بالسيارة الأخرى (على افتراض أنها استمرت في الحركة بسرعة ثابتة)؟

* **.51** (III) لو فرضنا في المسألة السابقة أنّ سرعة السيارة الأخرى مجهولة، ولو فرضنا أنّ سيارة الشرطة تسارعت بانتظام بالكيفية نفسها، ولحقت بها بعد 7.00 s. فماذا ستكون سرعة السيارة الأخرى؟

* **.52** (III) سيارتان تقتربان من زاوية شارع بزاوية قائمة مع بعضهما بعضًا (الشكل 3-41). تتحرك السيارة (1) بالنسبة إلى الأرض بسرعة $v_{1E} = 35\ km/h$، والثانية بسرعة $v_{2E} = 55\ km/h$. ما السرعة النسبية للسيارة (1) بالنسبة إلى السيارة (2)؟ وما السرعة النسبية للسيارة (2) بالنسبة إلى السيارة (1)؟



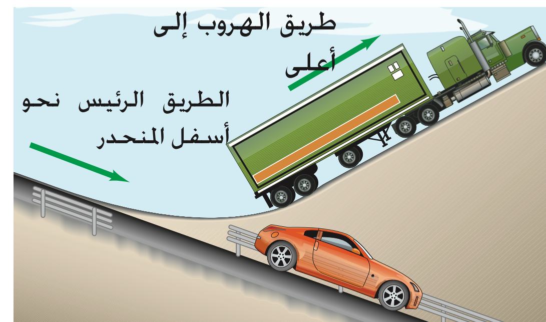
الشكل **3-41** المسألة 52

مسائل عامة

.53 يريد رامٍ إطلاق سهم صوب تفاحة موضوعة على رأس ابنه الذي يبعد مسافة 27 m عنه. إذا وجه الرامي السّهم مباشرة باتجاه التفاحة، فإنها تكون بالمستوى نفسه للرمي. ماذا ستكون الزاوية مع المدى الأفقي التي سيطلق بها السهم حتى يصيب التفاحة، إذا انطلق السهم بسرعة مقدارها 35 m/s؟

.54 يسير رجل 50 m باتجاه الشرق، ثم يسير 25 m باتجاه الجنوب ليصل إلى مصعد ويهبط فيه مسافة 10 m إلى الأسفل (تحت الأرض). ما إزاحة الرجل بالنسبة إلى نقطة البداية؟ اكتب الإجابة بدلالة المركبات باتجاه المحاور x، y، z. افرض أنّ المحور x يمثل الشرق، والمحور y يمثل الشمال، والمحور z يمثل الأعلى.

.55 تصمم الطرق في بعض المنحدرات الجبلية بحيث يكون في أسفل الطريق المنحدر مخرج جانبي يتجه إلى الأعلى للشاحنات التي تواجه مشكلة في الكوابح (انظر الشكل 3-42) إذا كان الطريق الجانبي يميل بزاوية 32^o مع الطريق الرئيس، فاحسب مركبتي التسارع الأفقية والعمودية لشاحنة تتباطأ من سرعة 120 km/h إلى الصفر في زمن مقداره 6.0 s.



الشكل **3-42** المسألة 55

.56 ما المركبة الصادية للمتجه (في المستوى السيني الصادي x_y) الذي مقداره 88.5 ومقدار مركبته السينية (x) 75.4 ؟ ما اتجاه هذا المتجه (الزاوية التي يصنعها مع محور السينات)؟

.57 تصنع قطرات المطر زاوية θ مع العمودي كما تظهر من نافذة قطار متحرك (الشكل 3-34) إذا كانت سرعة القطار v_T، فما سرعة قطرات المطر بالنسبة إلى الأرض على اعتبار أنها تسقط بشكل عموديّ؟



الشكل **3-43** المسألة 57

.58 تتحرك طائرة خفيفة باتجاه الجنوب بسرعة 155 km/h بالنسبة إلى الهواء الساكن. بعد ساعة واحدة (1.00 h) يلاحظ قائد الطائرة أنها قطعت 125 km فقط باتجاه يصنع زاوية (°45.0) مع الجنوب الشرقي. ما سرعة الرياح التي أثرت في الطائرة؟

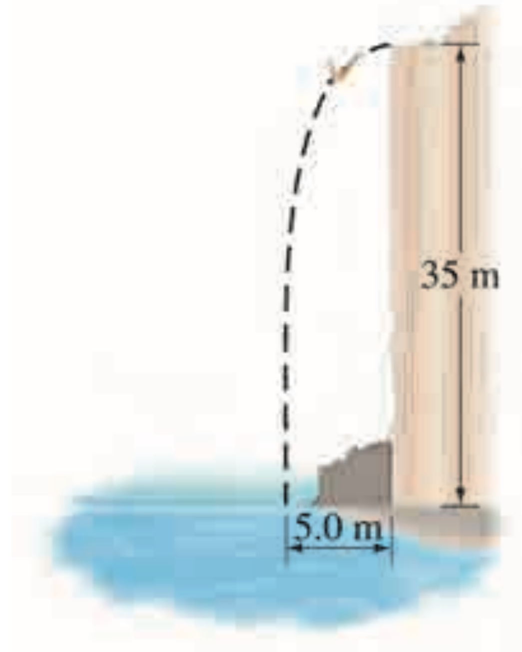
.59 تتحرك سيارة بسرعة 95 km/h، وتتجاوز قطارًا طوله 1.00-km يسير بالاتجاه نفسه على سكة موازية للطريق. إذا كانت سرعة القطار 75 km/h، فما الزمن الذي تحتاج إليه السيارة حتى تتجاوز القطار؟ وكم المسافة التي تتحركها السيارة في هذا الزمن؟ ما الإجابة إذا كان القطار والسيارة يتحركان باتجاهين متعاكسين؟

60. يستطيع لاعب أولمبي في القفز الطويل أن يقفز 8.0 m. لو افترضنا أنّ سرعته الأفقية 9.1 m/s عندما يغادر سطح الأرض، فما زمن تحليقه الكلي في الهواء؟ وما أقصى ارتفاع يصل إليه؟

61. عندما يقذف رائد فضاء مركبة أبولو كرة بيسبول على سطح القمر، فإنها تقطع مسافة أفقية مقدارها 180 m، فإذا قذف اللاعب الكرة بالسرعة نفسها وبالزاوية ذاتها على سطح الأرض، فإنها تقطع مسافة أفقية مقدارها 35 m فقط. احسب تسارع جاذبية القمر. (أهمل مقاومة الهواء في الحالتين).

62. يضرب شخص كرة بمضرب باتجاه جدار يرتفع 7.5 m عن سطح الأرض ويبعد 95 m عنه. احسب أقلّ سرعة تنطلق بها الكرة لتتجاوز الجدار على اعتبار أنها تنطلق من ارتفاع 1.0 m عن سطح الأرض، وبزاوية 38° مع المدى الأفقي.

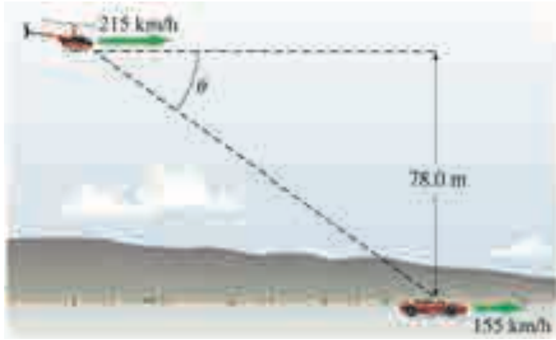
63. يقفز الغواصون على نحو أفقي من تلة ارتفاعها 35 m فوق سطح الماء. ما أقلّ سرعة يجب أن ينطلق بها الغواصون لتجنب صخرة تقع أسفل التلة وتبعد 5.0 m عن قاعدتها؟ وما زمن التحلق الكلي لهم؟ (انظر الشكل 3-44)



الشكل 3-44 المسألة 63

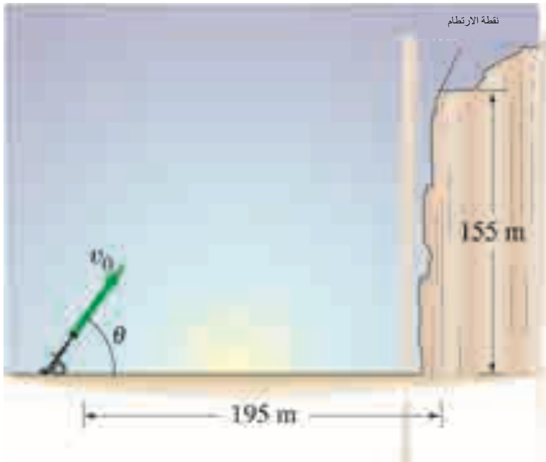
64. عند استهلال ضرب الكرة، فإنّ لاعب التنس الأرضي يهدف لضرب الكرة على نحو أفقي. ما أقلّ سرعة يحتاج إليها اللاعب كي تتجاوز الكرة الشبكة التي ترتفع 0.90 m عن الأرض، وتبعد 15.0 m عن اللاعب إذا انطلقت الكرة من ارتفاع 2.50 m؟ أين ستسقط الكرة إذا تجاوزت الشبكة فقط (هل سيكون من المنطقي أن تسقط على بعد 7.0 m عن الشبكة)؟ كم ستمكث الكرة في الهواء؟ انظر (الشكل 3-45).

65. يطير جاسوس باستخدام طائرة هليوكبتر بسرعة أفقية مقدارها 215 km/h بهدف إسقاط وثائق سرية على عميل يقود سيارته بسرعة 155 km/h على الطريق السريع الذي يقع على مسافة 78.0 m تحت الطائرة. على أيّ زاوية (مع المدى الأفقي للطائرة) يجب أن تكون السيارة عند سقوط الطرد الشكل 3-46)؟



الشكل 3-46 مسألة 65

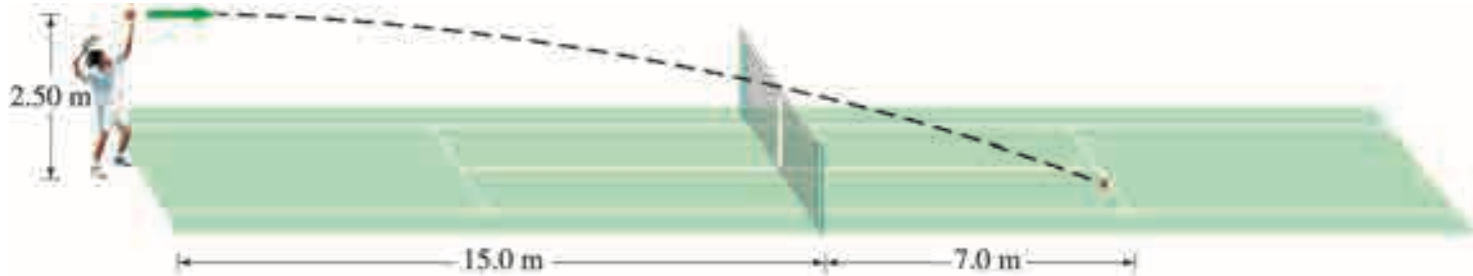
66. سرعة قارب في الماء الراكد v. إذا أراد القارب أن يتجول في نهر يجري بسرعة u. اشتقّ صيغة للزمن اللازم لقطع مسافة مقدارها D إذا تحرك القارب: (أ) ضد التيار ثم عاد معه. (ب) مباشرة باتجاه عرض النهر ثم عاد. يجب أن نفرض أنّ $u < v$، لماذا؟



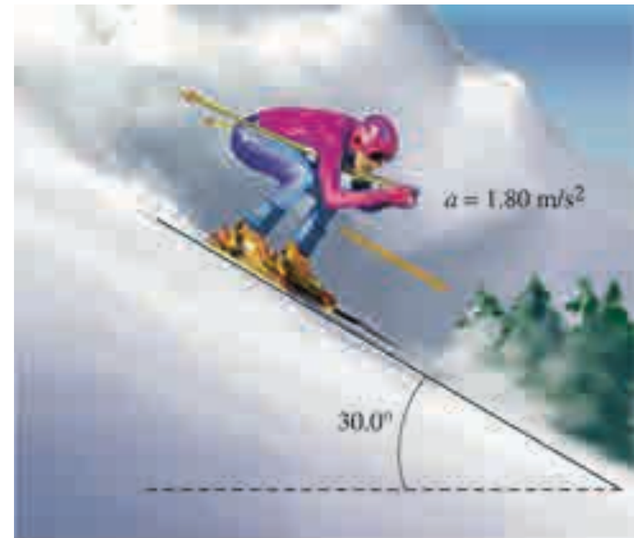
الشكل 3-47 مسألة 67

67. أُطلقت قذيفة من سطح الأرض باتجاه قمة تلة ارتفاعها 155 m، وتبعد 195 m عن نقطة الإطلاق (انظر الشكل 3-47) إذا وصلت القذيفة إلى قمة التلة بعد 7.6 s من إطلاقها، فأوجد السرعة الابتدائية للقذيفة (بالمقدار والاتجاه). أهمل مقاومة الهواء.

الشكل 3-45 المسألة 64



.68 يتسارع متزلج لأسفل منحدر يميل بزاوية °30.0 عن المدى الأفقي بمعدل $1.80\ m/s^2$ (الشكل 48-3). (أ) ما المركبة العمودية لتسارعه؟ (ب) كم الزمن الذي يحتاج إليه ليصل أسفل المنحدر الذي طوله 335 m على افتراض أنه بدأ الحركة من السكون؟

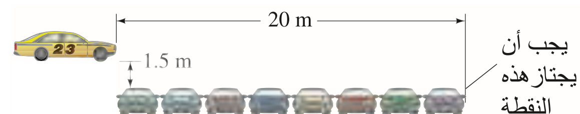


الشكل **3-48** المسألة 68

.69 تنطلق كرة السلة من يد لاعب من ارتفاع 2.10 m عن سطح الأرض باتجاه السلة التي ترتفع 2.60 m عن سطح الأرض. إذا أطلق اللاعب الكرة بزاوية °38.0، وإذا كانت السلة تبعد عن اللاعب مسافة أفقية مقدارها 11.00 m ويجب أن تكون بدقة ± 0.22 m (أفقيا)، فما مدى السرعة الابتدائية التي يمكن أن تحقق هدفا؟

.70 غطاس يترك حافة لوح الغطس الذي يرتفع 5.0 m ويصطدم بالماء بعد 1.3 s، وعلى مسافة 3.0 m من حافة لوح الغطس. احسب: (أ) السرعة الابتدائية للغطاس $\vec{v}_0$. (ب) أقصى ارتفاع يصله. (جـ) السرعة $\vec{v}_f$ التي يصل فيها إلى سطح الماء.

.71 سائق إثارة يريد أن يقفز بسيارته عن ثماني سيارات تصطف جنبا إلى جنب تحت حافة أفقية ترتفع 1.5 m عن السيارات (الشكل 49-3). (أ) ما أقل سرعة يجب أن ينطلق بها حتى يتجاوز السيارات، إذا كانت المسافة الأفقية لها مجتمعة 20 m؟ (ب) إذا مالت الحافة للأعلى بزاوية مقدارها °10، فما أقلّ سرعة في هذه الحالة؟



الشكل **3-49** المسألة 71

.72 يضرب لاعب البيسبول الكرة بمضرب من ارتفاع 0.90 m فوق الأرض، وبزاوية °61، وبسرعة ابتدائية مقدارها 28 m/s. (أ) ما المسافة الأفقية التي ستقطعها الكرة قبل أن يلتقطها أحدهم؟ (ب) إذا تحرك أحد اللاعبين على نحو مستقيم من مسافة 105 m فكم ستكون سرعته حتى يستطيع التقاط الكرة من مستوى سطح الأرض؟

.73 عند $t = 0$، يضرب لاعب البيسبول الكرة بسرعة ابتدائية مقدارها 32 m/s، وبزاوية °55 مع المدى الأفقي. ينطلق لاعب يبعد عن ضارب الكرة 85 m عند $t = 0$ ويصنع الخط الواصل بينهما زاوية °22 مع خط إطلاق الكرة (انظر الشكل 50-3) للإمساك بالكرة. ما مقدارُ السرعة واتجاهُها التي يجب أن يتحرك بها هذا اللاعب ليتمكن من الإمساك بالكرة من مستوى إطلاقها نفسه؟



الشكل **3-50** مسألة 73

.74 أُطلقت كرة من قمة بناية بسرعة ابتدائية مقدارها 18 m/s، وبزاوية $\theta = 42°$ مع الأفقي. (أ) ما المركبتان السينية والصادية للسرعة الابتدائية؟ (ب) إذا كانت هنالك بناية قريبة لها الارتفاع نفسه، وتبعد مسافة 55 m، فعند أيّ مسافة على سطح العمارة الثانية ستسقط الكرة؟

.75 إذا اشتريت بندقية تقذف طلقات بلاستيكية، وكنت طالب فيزياء ذكيًا وقررت أن تعمل حسابات سريعة لإيجاد أقصى مدى أفقي. إذا أطلقت طلقة عموديًا نحو الأعلى فعادت بعد 4.0 s إلى ماسورة البندقية، فما أقصى مدى أفقي لبندقيتك؟

إجابات التمارين

أ: عندما يكون D_1، و D_2 بالاتجاه نفسه.
ب: $3\sqrt{2} = 4.24$
جـ: ستصطدمان بالأرض في الوقت نفسه.
د: كلتا الكرتين تصل إلى الارتفاع نفسه، ومن ثَمّ يكون لهما زمن التحليق نفسه.
هـ: b



تبدأ هذه الطائرة بالإقلاع. وهي تتسارع وتزداد سرعتها باضطراد كبير. ولكي يتم ذلك؛ يجب التأثير فيها بقوة حسب قانون نيوتن $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$. فما الذي تؤثر فيه هذه القوة؟ يؤثر محركا الطائرة النفاثان بقوة عظيمة في الغازات فيدفعانها باتجاه مؤخرة الطائرة (ويرمز إلى هذه القوة بـ $\vec{\mathbf{F}}_{GP}$). وحسب قانون نيوتن الثالث،فإن هذه الغازات المدفوعة للخلف تؤثر بقوة مساوية ومعاكسة بالاتجاه في الطائرة (باتجاه مقدمتها).و"ردود الفعل " هذه هي القوة المؤثرة في الطائرة. وينتج تسارع الطائرة نحو الأمام عن الغازات، ويرمز إليها بـ $\vec{\mathbf{F}}_{PG}$.

الفصل 4

علم التحريك (الدّيناميكا): قوانين نيوتن في الحركة



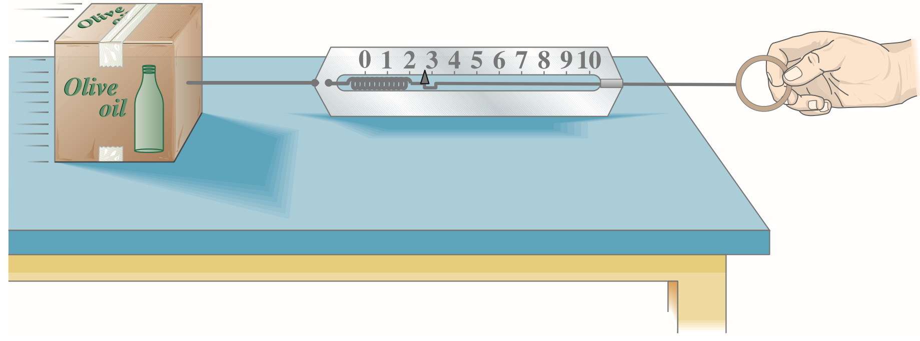
الشكل 4-1 قوة أثرت في عربة مشتريات – في هذه الحالة - بواسطة طفلة.

لقد تناولنا كيفية وصف الحركة بدلالة السرعة المتجهة والتسارع. أما الآن، فسوف نتعامل مع السؤال الآتي: لماذا تتحرك الأجسام بالطريقة التي تتحرك بها: ما الذي يدفع جسما ساكنا إلى البدء بالحركة؟ وما السبب وراء تسارع أو تباطؤ جسم ما؟ وما الأمور المرتبطة بحركة الجسم الدائرية؟ نستطيع أن نجزم بضرورة وجود قوة للإجابة عن كلّ تساؤل تمّ طرحه في هذا السياق. وسوف ندرس في هذا الفصل العلاقة بين القوة والحركة، وهو ما يسمى بموضوع **علم التحريك**.

وسوف نبدأ بأفكار مبدئية عن ماهية القوة، ثم نناقش قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة. ومن ثمّ نتناول عدة أشكال للقوى، ومن ضمنها قوة الاحتكاك، وقوة جذب الأرض للأجسام، ثم نطبّق بعد ذلك قوانين نيوتن على مسائل واقعية.

4-1 القـوّة

بداية، سوف نتعامل مع القوة على أنها ما يعمل على دفع جسم ما أو سحبه، فعندما تدفع سيارة معطلة، أو حتى عربة مشتريات (الشكل 4 - 1)، فأنت تؤثر في السيارة أو العربة بقوة. وكذلك في الأمثلة التالية: عندما يرفع ماتور مصعدا، أو تدق مطرقة مسمارا، أو يكنس الهواء أوراق الأشجار، فهناك قوة ما تمّ التأثير بها. ونحن نقول بأنّ جسما ما قد وقع أرضا بسبب *جذب الأرض له*.



الشكل 4 - 2 ميزان نابض يستخدم لقياس القوة.

يحتاج الجسم إلى قوة ما كي يبدأ بالحركة من وضع السكون؛ أي أنّ القوة ضرورية للجسم كي يتسارع من السرعة المتجهة الصفرية إلى سرعة متجهة لا تساوي الصفر. أما الجسم المتحرك، فيحتاج أيضا إلى قوة كي تغير من حالته (سرعته المتجهة) سواء قيمةً أو اتجاها.

قياس القوة

إنّ إحدى الطرائق المستخدمة لقياس قيمة (أو شدة) القوة تتم بواسطة المقياس الزنبركي (الشكل 4 - 2). عادة ما يتمّ استخدام هذا المقياس النابض لإيجاد وزن الجسم، ونعني هنا بالوزن قوة جذب الأرض المؤثرة في الجسم (البند 4 - 6). ويمكن استخدام هذا المقياس (بعد معايرته) لقياس أنواع أخرى من القوى، مثل قوة السّحب، كما في (الشكل 4-2).

هناك تأثير مختلف للقوة المؤثرة في عدة اتجاهات، وبكل وضوح فإنّ للقوة اتجاهًا، كما أنّ لها قيمة بالطبع.

ويعتمد تأثير القوة على اتجاه تأثيرها، وبالطبع، فإننا نتعامل مع القوة كمتجه؛ أي أنّ لها اتجاهًا كما أنّ لها قيمة. وهي بذلك تتبع قوانين جمع المتجهات كما تمت مناقشتها في الفصل الثالث. وعليه، نستطيع أن نمثل أيّ قوة بسهم على المخطط البيانيّ، كما عملنا مع السرعة المتجهة، بحيث يدل اتجاه السهم على اتجاه قوة الدفع أو السّحب، أما طول السّهم فيكون متناسبا مع قيمة القوة المؤثرة.

2-4 قانون نيوتن الأول في الحركة

أرسطو مقابل جاليليو

ما العلاقة بين القوة والحركة؟ اعتقد أرسطو (322 – 384 ق م Aristotle) بأنّ القوة ضرورية لإبقاء الجسم متحركًا على سطح أفقي، فَعَدَّ الحالة الطبيعية للجسم حالة السكون، وأنّ الجسم بحاجة إلى قوة تؤثر فيه لإبقائه متحركا، وكذلك جادل بأنّ سرعة الجسم ستزداد كلما ازدادت القوة المؤثرة فيه.

واختلف معه جاليليو (Galilio) بعد حوالي 2000 عام؛ فجادل بأنّ الوضع الطبيعيّ للجسم هو بقاؤه متحركا، وبسرعة متجهة ثابتة، أو بقاؤه ثابتا في موضعه.

ولكي نفهم فكرة جاليليو، فسنعتمد على الملاحظات التالية الناتجة من جسم يتحرك على سطح أفقي: يتطلّب الأمر قوة مناسبة معينة للمحافظة على سرعة ثابتة للجسم عند دفعه على سطح أفقيّ خشن، كما يتطلّب الأمر قوة ذات قيمة أقلّ من سابقتها للمحافظة على السّرعة السابقة نفسها على سطح أفقيّ أملس.

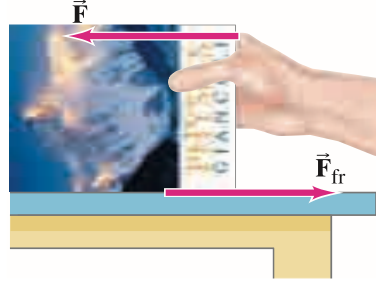
إضافة إلى أنّ وضع طبقة من أيّ مادة ملينة أو من الزيت بين الجسم وسطح الطاولة يؤدي إلى الاستغناء عن أيّ قوة إضافية لتحريك الجسم.

ولاحظ تناقص قيمة القوة المؤثرة عند كلّ حركة لاحقة، أما الخطوة التالية، فسنتخيل أنّ الجسم لن يخضع لأيّ احتكاك نهائيا على سطح الطاولة؛ أي كأنّ سطح الطاولة مدهون بمادة زيتية مثالية . وما أن يتحرك الجسم فوقها، فإنه سيستمر بالحركة فوق سطحها بسرعة ثابتة دون أن يتأثر بأيّ قوة احتكاك، وكمثال على هذا الوضع، خذ كرة حديدية تتدحرج على سطح أفقي صلب، أو قرصا يتحرك على طاولة هوائية بحيث تعمل طبقة الهواء الرقيقة على سطح الطاولة على تقليل الاحتكاك إلى درجة العدم.

كانت هذه عبقرية جاليليو التي جاءت بفكرة انعدام الاحتكاك التي ساعدت على فهم أوسع وأعمق وأدق للعالم الحقيقي من حولنا، وهذه المثالية هي التي قادته إلى استنتاجه المشهور؛ وهو أنّ الجسم المتحرك سيستمر في حركته بسرعة ثابتة في خطّ مستقيم مالم تؤثر فيه قوة، وأنّ الجسم سيبدأ بالتباطؤ عندما تؤثر فيه قوة فقط، وعليه، فسّر جاليليو الاحتكاك على أنه قوة مثل قوتي الدفع والسّحب الاعتياديتين.

الاحتكاك كقوة

يتطلب الأمر قوة من يدك لدفع جسم فوق سطح طاولة، ليسير بسرعة ثابتة بعد التغلب على قوة الاحتكاك (الشكل 4 - 3). فعندما يتحرك الجسم على سطح الطاولة بسرعة ثابتة، تكون قوة الدفع قد عادلت بالمقدار قوة الاحتكاك، ولكن بما أنّ القوتين متعاكستان في الاتجاه، فإنّ محصلة القوى على الجسم (الجمع الاتجاهي للقوتين) ستساوي صفرا. ويُعدّ هذا متوافقًا مع وجهة نظر جاليليو، لجسم يتحرك بسرعة ثابتة دون أن يتأثر بأيّ قوة محصلة



الشكل 4 - 3 تمثل $\vec{F}$ القوة التي يؤثر فيهاالشّخص، في حين تمثّل $\vec{F}_{fr}$ قوة الاحتكاك.

قانون نيوتن الأول في الحركة

بناءً على هذا الأساس الذي وضعه جاليليو، بنى إسحق نيوتن (الشكل 4-4) نظريته العظيمة عن الحركة. وتم تلخيص تحليل نيوتن للحركة في «قوانين الحركة الثلاثة» المشهورة. في عمله العظيم: «المبادئ» (*Principia*) التي نشرت في عام 1687، اعترف نيوتن وأقرّ بعرفانه لجاليليو. وفي الحقيقة، يقترب **قانون نيوتن الأول في الحركة** إلى حدّ كبيرٍ من استنتاجات جاليلو، الذي يعطى كالتالي:

يبقى الجسم على حاله ساكنا، أو يتحرك بسرعة منتظمة في خطّ مستقيم، مالم تؤثر فيه قوة خارجية.

القصور الذاتي

ويعرّف ميل الجسم للبقاء على حالة من السكون أو الحركة المنتظمة في خطّ مستقيم بالقصور الذاتي.

الشكل 4-4
إسحق نيوتن (1642 - 1727)



المثال المفاهيمي 4-1 **قانون نيوتن الأول**

إن وقوف حافلة مدرسية على نحوٍ مفاجئ يؤدي إلى انزلاق الحقائب المدرسية على أرض الحافلة نحو الأمام. فما القوة المسؤولة عن حركة الحقائب هذه؟

الإجابة: ليس هناك أيّ "قوة" مسؤولة عن هذه الحركة. فقد استمرت الحقائب على حالة الحركة، محافظة على سرعتها (وربما تعمل قوة الاحتكاك على إبطائها)، عندما تناقصت سرعة الحافلة.

أطر القصور المرجعية

أطر القصور المرجعية

نستطيع أن نصرّح بالعبارة التالية من غير تحفظ: من غير الممكن تطبيق قانون نيوتن الأول في الأطر المرجعية جميعها. وعلى سبيل المثال، لو كان الإطار المرجعي ثابتًا داخل سيارة تتسارع، فهناك احتمال أن يبدأ الكوب المثبت على رفّ السّيارة الأمامي بالتحرك باتجاه السائق (علما بأنّ الكوب سيبقى ثابتًا في موضعه طوال فترة تحرك السّيارة بسرعة ثابتة). وقد يبدأ الكوب بالتسارع باتجاه السّائق على الرّغم من عدم تأثره بأيّ قوة في ذلك الاتجاه، إضافة إلى عدم تأثره بأيّ جسم آخر. وبالمثل، ففي الإطار المرجعي للحافلة، كما في (المثال 4-2)، لم تكن هناك أيّ قوة تدفع حقائب الظهر إلى الأمام.

وعليه، فإنّ قانون نيوتن الأول غير صالح، ولا يمكن تطبيقه خلال الأطر المرجعية المتسارعة. وتُسمّى الأطر المرجعية التي لا ينطبق قانون نيوتن الأول عليها بالأطر المرجعية القصورية (للدلالة على إمكانية تطبيق قانون القصور الذاتي خلالها). ونستطيع الافتراض في معظم الأوقات بأنّ الأطر المرجعية الثابتة على الأرض هي أطر قصورية. (علماً بأنّ هذا الكلام غير دقيق تمامًا بسبب دوران الأرض، ومع هذا فهو قريب جدًّا من الحقيقة). ويُعدّ أيّ إطار مرجعي يتحرك بسرعة ثابتة (مثل السيارة أو الطائرة) مقارنة بإطار قصري إطارًا مرجعيًّا قصريًّا. وتُسمّى الأطر المرجعية المتسارعة التي لا نستطيع تطبيق قانون القصور الذاتي من خلالها بالأطر المرجعية اللاقصورية. وللإجابة عن التساؤل حول كيفية أو طريقة التأكد من قصورية إطار مرجعي ما من عدمه؛ نلجأ إلى قانون نيوتن الأول، ونفحص مدى تحقّقه. وعليه، فإنّ قانون نيوتن الأول سيكون له دور رئيس في تعريفنا بأطر القصور المرجعية.

3-4 الكتلة

الكتلة كقصور ذاتي

يرسّخ قانون نيوتن الثاني، الذي سنتعرض له في البند التالي مبدأ الكتلة. حيث استخدم نيوتن كلمة كتلة كمرادف لكمية المادة. وتُعدّ هذه المبادرة بالتسمية غير دقيقة؛ لأنّ مبدأ "كمية المادة" هو نفسه غير معرف بدقة. ولكي نكون أكثر دقه، نستطيع القول بأنّ الكتلة هي مقياس مدى قصور جسم ما. وكلّما ازدادت الكتلة، ازدادت قيمة القوة اللازمة التي تعطي جسم ما تسارعًا معينًا. وأنه من الصعوبة بمكان أن تدفع جسمًا ما ليبدأ حركته من السكون، أو لإيقافه وهو متحرك، أو لتغيّر من سرعته الجانبية بعيدًا عن مساره في خطٍّ مستقيم. وتمتلك الشاحنة قصورًا ذاتيًا أعلى بكثير ممّا تمتلكه كرة (القاعدة) البيسبول التي تتحرك بالسرعة نفسها. وعليه، فإنّ الشاحنة ستتطلب قوة أعلى بكثير لتتغير سرعتها بمعدل تغير سرعة الكرة نفسه. أي أنّ الشاحنة تمتلك كتلة أكبر. لذا، يجب أن نعرف وحدة جديدة لنتمكن من التعامل مع الكتلة ككمية يمكن قياسها. وبالرجوع إلى الوحدات الدولية، فإنّ وحدة الكتلة هي **الكيلوغرام** (kg) كما تمت مناقشتها في (البند 1-5) من الفصل الأول.

⚠ **تنويه**

الفرق بين الكتلة و الوزن

وغالباً ما يتم الخلط بين كلّ من الكتلة والوزن. لذا، فإنّ التمييز بينهما مهم. فالكتلة هي خاصية للجسم نفسه (وهي قياس لقصوره أو "لكمية مادته"). أما على الجانب الآخر، فالوزن هو قوة سحب الجاذبية المؤثرة في الجسم. ولكي نرى الفرق بينهما، سنفترض أننا سنأخذ جسما ما إلى القمر، وهنا سنجد أنّ وزن الجسم على القمر يعادل سدس وزنه فقط على الأرض؛ وذلك لصغر مقدار جاذبية القمر. ومع هذا تبقى كتلة الجسم على القمر كما هي على الأرض لعدم تغير مقدار ما تحتويه من مادة على القمر مقارنة بما تحتويه على الأرض. وعليه، فإنه سيمتلك مقدار القصور نفسه أيضاً (بعدم وجود الاحتكاك) وهذا ما يفرض درجة الصعوبة نفسها في دفعه لبدء الحركة أو التوقف عن الحركة، سواء أكان على القمر أم على الأرض. (سنتكلم أكثر عن الوزن في البند 4-6).

4-4 قانون نيوتن الثاني في الحركة

يخبرنا قانون نيوتن الأول في الحركة أنّ الجسم الساكن يبقى ساكنا، والجسم المتحرك يبقى متحركا بسرعة ثابتة في خطّ مستقيم ما لم تؤثر فيه محصلة قوى خارجية تغير من حالته .
ويصبح السؤال الآن هو: ماذا سيحدث لهذا الجسم إذا أثرت فيه محصلة قوى خارجية؟ أدرك نيوتن أنّ إجابة هذا التساؤل هو تغير سرعة الجسم (الشكل 4 - 5). وأنّ تأثر الجسم بمحصلة قوى قد يعمل على زيادة سرعته. وأما إذا كانت هناك محصلة قوى تؤثر في الاتجاه المعاكس، فإنها ستعمل على تقليل سرعة الجسم. وإذا أثرت القوة في الجسم المتحرك في الاتجاه الجانبي، فستعمل هذه القوة على تغيير السرعة المتجهة (وربما ستعمل على تغيير قيمتها أيضا). وبما أنّ التغير في السرعة المتجهة هو التسارع (البند 4-2)، فإننا نستطيع القول *بأنّ محصلة القوى ستسبب تسارعا*.



الشكل 4 - 5 تسارع الزلاجة بسبب تأثرها بقوة دفع الفريق.

ما العلاقة بين التسارع والقوة بالتحديد؟ تقترح تجارب الحياة اليومية الإجابة عن هذا التساؤل. ولنأخذ بالحسبان القوة الضرورية لدفع عربة عند غياب الاحتكاك. (أما عندما يكون الاحتكاك غير مهملٍ، فخذ بالحسبان محصلة قوى تعادل القوة المؤثرة مطروحًا منها قيمة قوة الاحتكاك) .
وعندما تدفع العربة بقوة خفيفة وثابتة لفترة زمنية معينة، ستبدأ العربة بالتسارع من السكون إلى سرعة ما، ولنقل إلى 3 km/h. والآن، إذا دفعت العربة بضعف القوة السابقة، فستصل العربة إلى السرعة السابقة 3 km/h خلال نصف الوقت الذي احتاجت إليه سابقا. أي أنّ التسارع سيصبح ضعف ما كان عليه في الحالة السابقة. والآن، إذا رفعت مقدار القوة المؤثرة إلى ثلاثة أضعاف ما كانت عليه في المرة الأولى، فسيرتفع مقدار التسارع إلى ثلاثة أضعاف الحالة الأولى، وهكذا دواليك. أي أنّ تسارع الجسم يتناسب طردياً * مع قيمة القوة المحصلة المؤثرة.
ومع هذا، فإنّ التسارع لا يزال معتمدًا على كتلة الجسم أيضا. وستشعر بالفرق في التسارع الناتج عندما تدفع عربة مشتريات فارغة مقارنة بدفعك العربة نفسها وهي مليئة بالأغراض، وبقوة الدفع السابقة نفسها؛ حيث إن العربة في الحالة الثانية ستتحرك بتسارع أقلّ أو بتباطؤ أعلى. وكلما ازدادت الكتلة، قلّ التسارع للقوة المؤثرة نفسها. وتصبح المعادلة الرياضية كما جادل نيوتن بأنّ تسارع الجسم يتناسب عكسيًّا مع كتلته. ولقد وُجد أنّ هذه العلاقات صحيحة على نحو عام. ويمكن تلخيصها كالتالي :

قانون نيوتن الثاني في الحركة

يتناسب تسارع الجسم طرديًّا مع محصلة القوة المؤثرة فيه، وعكسيًّا مع كتلته. وينطبق اتجاه التسارع مع اتجاه محصلة القوى المؤثرة في الجسم. وهذا هو قانون نيوتن الثاني في الحركة.

* تظهر مراجعة التناسبية في الفهرس في آخر الكتاب

القوة المحصلة

يمكن كتابة قانون نيوتن الثاني كمعادلة:

$$\vec{\mathbf{a}} = \frac{\Sigma \vec{\mathbf{F}}}{m}$$

حيث تمثل $\vec{\mathbf{a}}$ التسارع، والكتلة m. أما محصلة القوى على الجسم فهي في حين يعني الرمز $\sum$ (سيجما باليونانية) "مجموع". وتعني $\vec{\mathbf{F}}$ القوة. وعليه، فإن $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ تعني المجموع المتجه للقوى المؤثرة جميعها في الجسم، والتي نعرفها **بمحصلة القوى**. ونعيد ترتيب هذه المعادلة للحصول على العبارة المشهورة لقانون نيوتن الثاني:

قانون نيوتن الثاني في الحركة

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}. \qquad \textbf{(1-4)}$$

تعريف القوة

ويربط قانون نيوتن الثاني وصف الحركة بمسبباتها؛ أي بالقوة. وهو أحد أهم العلاقات الأساسية والجوهرية في الفيزياء. ونستطيع صياغة تعريف أكثر دقة بناءً على قانون نيوتن الثاني للقوة على أنه الفعل *القادر على تسريع الجسم*.

إنّ قوة $\vec{\mathbf{F}}$ كلّها كمية متجهة لها مقدار واتجاه. وأنّ (المعادلة 4-1) هي معادلة متجهة صالحة في أيّ إطار قصوري مرجعي. وعليه، يمكن كتابتها على شكل مركبات خاضعة للإحداثيات الديكارتية كالتالي:

$$\Sigma F_x = ma_x, \qquad \Sigma F_y = ma_y, \qquad \Sigma F_z = ma_z$$

وإذا تمت الحركة على امتداد خط ما (أو في بعد واحد)، فنستطيع عندها التخلّص من الرمز السّفليّ، ونكتب ببساطة $\Sigma F = ma$.

وحدة القوة: النيوتن

وعند استخدام الوحدات الدولية مثل الكيلوغرام للكتلة، نجد أنّ وحدة القوة هي **النيوتن** (N). أي أنّ $1\ \text{N}$ هو مقدار القوة الضرورية لإكساب كتلة مقدارها $1\ \text{kg}$ تسارعًا مقداره $1\ \text{m/s}^2$. أي أنّ $1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$.

أمّا في نظام الوحدات السغثية cgs (سم، جم، ث)، فإنّ وحدة الكتلة هي الجرام (g) كما ذكر سابقًا*. ووحدة القوة هي الداين (*dyne*)، التي تم تعريفها على أنها القوة الضرورية لمنح كتلة مقدارها $1g$ تسارعًا مقداره $1\ \text{cm/s}^2$. وعليه، فإنّ $1\ \text{dyne}=1\ \text{g.cm/s}^2$. ويمكن بسهولة إثبات أنّ $1\ \text{dyne}=10^{-5}\ \text{N}$.

وحسب النظام البريطاني، فإنّ وحدة القوة هي *الباوند* (وباختصار lb) حيث إن $1\ \text{lb} = 4.4822\text{N} \approx 4.45\ \text{N}$. ووحدة الكتلة هي *السلغ* (*slug*) وتم تعريفها على أنها الكتلة التي ستتسارع بمقدار $1\ \text{ft/s}^2$ نتيجة تأثرها بقوة مقدارها $1\ \text{lb}$. لذا، فإنّ $1\ \text{lb}=1\ \text{slug.ft/s}^2$. ويلخص الجدول 4-1 الوحدات في الأنظمة المختلفة.

حل المسألة

استخدم مجموعة وحدات متوائمة

وتجدر الإشارة هنا إلى أهمية استخدام نظام واحد للوحدات خلال حلّ أيّ مسألة، علمًا بأنّه يفضّل استخدام نظام الوحدات الدولي. وإذا أُعطيت القوة بالنيوتن والكتلة بالغرامات، فيجب عندها تحويل وحدة الكتلة إلى الكيلوغرام قبل أيّ محاولة لحلّ السّؤال من أجل الحصول على التسارع. وعلى سبيل المثال، فإذا علمت بأنّ القوة $2.0\ \text{N}$ تؤثر في امتداد المحور السّيني، وأنّ الكتلة $500\ \text{g}$، فيجب تحويل وحدة الكتلة إلى $0.50\ \text{kg}$. وعليه، فإنّ وحدة التسارع ستعطى بدلالة m/s^2 من قانون نيوتن الثاني (حيث إن $1\ \text{N} = 1\ \text{kg.m/s}^2$):

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{2.0\ \text{N}}{0.50\ \text{kg}} = \frac{2.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{0.50\ \text{kg}} = 4.0\ \text{m/s}^2$$

الجدول 4-1
وحدات الكتلة والقوة

النظام	الكتلة	القوة
SI	الكيلوجرام (kg)	نيوتن (N) $(=\text{kg}\cdot\text{m/s}^2)$
cgs	الجرام (g)	داين $(=\text{g}\cdot\text{cm/s}^2)$
البريطاني	السلج (slug)	باوند (lb)

معامل التحويل: $1\ \text{dyne} = 10^{-5}\ \text{N}$; $1\ \text{lb} \approx 4.45\ \text{N}$.

المثال 4-2 **قدّر** **القوة اللازمة لتسريع سيارة سباق**

قدّر القوة اللازمة لتسريع: (أ) سيارة كتلتها 1000-g إلى $\frac{1}{2}g$.(ب) تفاحة كتلتها 200-g بالمعدل السابق ذاته.

النهج: نستطيع استخدام قانون نيوتن الثاني لإيجاد محصلة القوى اللازمة لكلّ جسم: حيث إننا نعرف الكتلتين والتسارع. وبما أنّ هذا مقدار تقريبيّ (حيث إنّ $\frac{1}{2}$ لا يُعدّ مقدارًا دقيقًا) فسنقربه إلى رقم مميز واحد.

* كن حذرًا ولا تخلط بين g مختصر الغرام و g تسارع الجاذبية الأرضية. ولاحظ أنّ عجلة الجاذبية الأرضية إما أن تكتب مائلة أو غامقة للدلالة على أنها متجه).

الحـلّ: (أ) إن تسارع السيارة هو : $a = \frac{1}{2}g = \frac{1}{2}(9.8\,\text{m/s}^2) \approx 5\,\text{m/s}^2$. ونستخدم قانون نيوتن الثاني للحصول على محصلة القوة الضرورية لهذا التسارع :

$$\Sigma F = ma \approx (1000\,\text{kg})(5\,\text{m/s}^2) = 5000\,\text{N}$$

(وإذا كنت معتادًا على الوحدات البريطانية، ولتحصل على فكرة عمّا تعني 5000-N: اقسم قيمة هذه القوة على 4.45 N/lb لتحصل على قوة تعادل 1000 lb تقريبا).

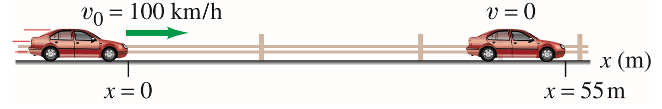
(ب) ولنجد القوة المؤثرة في التفاحة، فإنّ كتلتها $m = 200\,\text{g} = 0.200\,\text{kg}$، وعليه:

$$\Sigma F = ma \approx (0.200\,\text{kg})(5\,\text{m/s}^2) = 1\,\text{N}$$

المثال 4-3 **القوة اللازمة لإيقاف السيارة:**

ما متوسط محصلة القوة اللازمة لإيقاف سيارة كتلتها 1500-kg تماما من سرعة مقدارها 100 km/h خلال مسافة قدرها 55 m؟

النهج: نستطيع استخدام قانون نيوتن الثاني،$\Sigma F = ma$، لتحديد القوة بمعرفة كلٍّ من كتلة السيارة وتسارعها. وحيث إننا أعطينا الكتلة، فيجب علينا أن نحسب التسارع a. نفترض أنّ التسارع ثابت كي نتمكن من استخدام معادلات الحركة، (المعادلات 2 - 11)، لحساب التسارع.



الشكل **4-6** المثال 4 - 3

الحـلّ: نفترض أنّ الحركة على امتداد المحور السيني الموجب (الشكل 4-6). لقد أُعطينا السرعة الابتدائية $v_0 = 100\,\text{km/h} = 28\,\text{m/s}$ (البند 1 - 6)، والسرعة النهائية $v = 0$، والمسافة المقطوعة $x - x_0 = 55\,\text{m}$. من (المعادلة 2 - 11 جـ)، نحصل على:

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

لذا:

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2(x - x_0)} = \frac{0 - (28\,\text{m/s})^2}{2(55\,\text{m})} = -7.1\,\text{m/s}^2$$

وعليه، فإنّ محصلة القوة الضرورية هي:

$$\Sigma F = ma = (1500\,\text{kg})(-7.1\,\text{m/s}^2) = -1.1 \times 10^4\,\text{N}$$

وتعني الإشارة السالبة هنا أنّ اتجاه تأثير القوة هو بعكس اتجاه السرعة الابتدائية .

ملحوظة: عندما نفترض أنّ التسارع ثابت هنا بالرغم من عدم ضرورة أن يكون هذا صحيحاً، فإننا نقيس تسارعًا متوسطًا لنحصل على محصلة قوى متوسطة (والعكس صحيح)

يُعدّ قانون نيوتن الثاني قابلاً للتطبيق تمامًا مثل قانون نيوتن الأول خلال الأطر المرجعية القصورية فقط (البند 4 - 2). وعلى سبيل المثال، ففي الإطار المرجعي اللاقصوري لسيارة تتسارع، سيبدأ الكوب المثبت على الرّف الأمامي للسيارة بالانزلاق من موضعه والتسارع بالرغم من أن محصلة القوى عليه تساوي صفرًا. وعليه، فإنّ $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$ لن تعمل في هذا الإطار المرجعي المتسارع ولا يجوز تطبيقها هنا.

4-5 قانون نيوتن الثالث في الحركة

القوة المؤثرة في جسم ما والناتجة من تأثير جسم آخر.

يصف قانون نيوتن الثاني في الحركة كيفية تأثير القوى في الحركة من حيث المقدار. ويخطر ببالنا أنّ نتساءل الآن: من أين تأتي هذه القوى؟ تؤكد الملاحظات أنّ القوة المؤثرة في أيّ جسم ناجمة من تأثير جسم آخر. والأمثلة على ذلك كثيرة، ومن ضمنها الحصان الذي يجر العربة، والشخص الذي يدفع عربة المشتريات، والمطرقة التي تدفع مسمارًا، والمغناطيس الذي يجذب ملقط الورق. وفي هذه الأمثلة السابقة جميعها هناك جسم يؤثر بقوة ما في جسم آخر. وبالنظر إلى مثال من هذه الأمثلة السابقة نجد أنّ القوة التي تأثر بها المسمار هي نتيجة تأثير المطرقة.

كان نيوتن متيقنا أنه لا يمكن رؤية الأمور من جانب واحد فقط. فالمطرقة التي تؤثر في المسمار بقوة كما في (الشكل 4 - 7) لابدّ لها وأن تتأثر بالمثل بقوة من المسمار بدلالة التناقص السريع لسرعة المطرقة حتى تصل إلى وضع السكون نتيجة لتلامسهما. إذ من غير الممكن للمطرقة أن تقف بهذه الصورة لولا وجود قوة شديدة تسبب ذلك. وعندها أعلن نيوتن ضرورة معاملة الجسمين بالتساوي.

أي: **مثلما تؤثّر المطرقة بقوة في المسمار، سيؤثر المسمار بقوة في المطرقة. وهذا فحوى قانون نيوتن الثالث في الحركة وأساسه.**

قانون نيوتن الثالث في الحركة

كلما أثر جسم بقوة في جسم آخر، أثر الجسم الآخر بقوة مساوية مقدارًا ومعاكسة اتجاهًا في الجسم الأول.

وعادةً ما تتم صياغة هذا القانون على النحو التالي: **"لكلّ فعل ردّ فعل مساوٍ له بالمقدار ومعاكس له بالاتجاه"**. وهذا صحيح تماماً. ولكي نبتعد عن أيّ احتمال للفهم الخطأ؛ علينا تذكر أنّ قوة "الفعل" وقوة "ردّ الفعل" تؤثران في جسمين مختلفين.

تنويه

الفعل وردّ الفعل يؤثران في أجسام مختلفة.



الشكل 4-8 إذا دفعت بيدك حافة مكتب (يظهر متجه القوة باللون الأحمر) فإنّ المكتب سيدفع يدك في الاتجاه الآخر (تظهر هذه القوة بلون آخر، بنفسجي لكي نتذكر أنّ هذه القوة تؤثر في جسم آخر).



الشكل 4 - 7 تدق مطرقة مسمارًا. تؤثر المطرقة في المسمار بقوة، ويؤثر المسمار في المطرقة بقوة مماثلة للخلف. وتعمل القوة الأخيرة على تباطؤ المطرقة مؤدية بها إلى السكون.

وكدليل على صحة قانون نيوتن الثالث؛ انظر إلى يدك عندما تدفع حافة مكتب (الشكل4-8). ستجد أنّ شكل يدك قد تغير لوهلة. وهو دليل واضح على أنّ هناك قوّةً ما تؤثّر فيها. وسترى العلامة التي تركها المكتب وهو يضغط على يدك كردّة فعل. وتستطيع أيضا أن تشعر بتأثير قوة المكتب في يدك كذلك؛ إنّها مؤلمة!

وكلما دفعت المكتب بقوة أكبر. كانت قوة دفع المكتب على يدك أكبر أيضًا. (ستشعر بالقوى المؤثرة فيك فقط عندما تؤثر بقوة في الجسم الآخر. وستشعر بأنّ الجسم الآخر يدفعك كنتيجة لفعلك "دفعك" أنت).

وكمثال آخر نستعرض فيه قانون نيوتن الثالث. سننظر إلى المتزلجة على الجليد في (الشكل 4-9). إنّ مقدار الاحتكاك بين زلاجتيها والجليد يكاد يكون معدوما. ممّا سيجعلها تتحرك بحرية بعد تأثرها بأيّ قوة.



الشكل 4 - 9 مثال على قانون نيوتن الثالث في الحركة : عندما تدفع المتزلجة على الجليد الحائط، يدفعها الحائط إلى الخلف وهذه هي القوة التي تكسبها التسارع لتبتعد.

فعندما تدفع الحائط باتجاه. فإنّ الحائط سيدفعها في الاتجاه الآخر لتبدأ بالتحرك نحو ذاك الاتجاه. كما أنّ القوة التي تؤثر في الحائط لن تجعلها تبدأ بالحركة؛ لأنّ هذه القوة لا تؤثر فيها. بل في الحائط. وهناك شيء آخر يجب أن يؤثر فيها بقوة لكي تبدأ هي بالحركة. ولا يمكن لهذه القوة إلا أن تكون قد نجمت عن الحائط. وهذه القوة التي سيؤثر فيها الحائط على المتزلجة وبحسب قانون نيوتن الثالث ستكافئ بالمقدار وتعاكس بالاتجاه القوة التي أثرت بها في الحائط.

عندما يقذف شخص ما صندوقًا من قارب ساكن. يبدأ القارب بالتحرك. في الاتجاه المعاكس. وبهذا يكون الشّخص قد أثّر بقوة ما في الصندوق. في حين أثر الصندوق بقوة مماثلة بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه في الشخص. وهي القوّة ذاتها التي ستعمل على دفع الشخص (والقارب أيضًا) إلى الخلف قليلاً.

تسارع صاروخ

ويمكن تفسير الدّفع الصاروخيّ أيضًا باستخدام قانون نيوتن الثالث (الشكل 4 - 10). ومن المفاهيم العامة غير الصحيحة أنّ تسارع الصّواريخ ما هو إلا نتيجة لاندفاع الغازات من مؤخرة محركاتها لتعمل على دفع الأرض أو الغلاف الجوي في الاتجاه الآخر. وهذا بالطبع غير صحيح. وما يحدث فعلاً هو أنّ محركات الصواريخ تؤثر بقوة شديدة في الغازات فتطردها بعيدة عنها. وتؤثر هذه الغازات بالمقابل بقوة شديدة مكافئة ومعاكسة بالاتجاه في الصّواريخ. وهذه القوة الأخيرة هي المسؤولة عن دفع الصواريخ إلى الأمام – وهي القوة الناتجة من دفع الغازات للصواريخ. وعليه. فإنّ مركبة الفضاء يتم توجيهها في الفضاء الخارجي عن طريق تشغيل محركاتها الصاروخية بعكس اتجاه التسارع المراد اتباعه. وعندما يدفع الصاروخ الغازات في اتجاه ما. تدفع الغازات الصاروخ إلى الخلف بالاتجاه المعاكس.

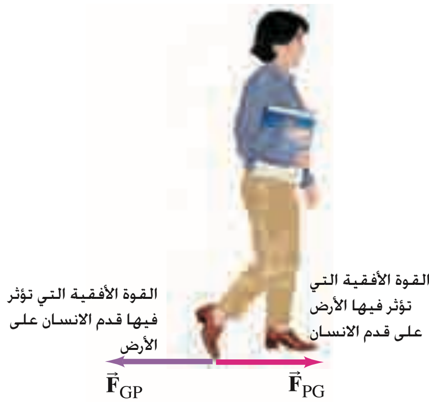


الشكل 4 - 10 مثال آخر على قانون نيوتن الثالث: إطلاق صاروخ يدفع محرك الصاروخ الغازات إلى الأسفل، وتؤثر الغازات في الصاروخ بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه، فتعمل على تسريعه إلى الأعلى. (لا يتسارع الصاروخ كنتيجة لدفع الغازات المنطلقة منه إلى الأرض).

كيف يمكن أن تمشي؟

وخذ طريقة سيرنا مثالًا على ذلك؛ يبدأ الشخص بالمشي عندما يدفع بقدميه الأرض إلى الخلف. لتؤثر الأرض بعد ذلك في الشخص بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه. فتدفعه إلى الأمام (الشكل 4 - 11) وهذه هي القوة المؤثرة في الشخص التي تحركه إلى الأمام. (وإذا كنت تشكك في هذا. فجرّب أن تمشي على نحو طبيعي على سطح أملس تمامًا من غير أيّ احتكاك مثل سطح الثلج الزلق والأملس). وبصورة مماثلة تمامًا. فإنّ الطّائر يطير إلى الأمام عندما يؤثر بقوة إلى الخلف في الهواء ليؤثر الهواء في أجنحته بقوة إلى الأمام. فتعمل على دفعه.

الشكل 4 - 11 نستطيع أن نمشي إلى الأمام؛ لأنه عندما تدفع إحدى القدمين الأرض نحو الخلف، تدفع الأرض القدم إلى الأمام، وتظهر الصورة القوتين المؤثرتين في جسمين مختلفين.



المثال المفاهيمي 4-4

ما الذي يؤثر بقوة في السيارة؟ ما الذي يجعل السيارة تتحرك إلى الأمام؟

الإجابة: من الإجابات العامة هو أنّ محرك السيارة هو الذي يحركها إلى الأمام. ولكن الحل الصحيح ليس بهذه البساطة؛ حيث إنّ محرك السيارة يعمل على دوران عجلاتها. ولكن لو أنّ هذه العجلات كانت تدور على طبقة من الثلج المصقول أو على أرض مغطاة بالوحل. فستبدأ بالدوران في موضعها. وعليه فإنّ هناك حاجة واضحة إلى الاحتكاك. تدفع العجلات الطريق إلى الخلف على الأرض الصلبة ليدفعها الطريق إلى الأمام بسبب الاحتكاك. وحسب قانون نيوتن الثالث. تدفع الطريق العجلات في الاتجاه المعاكس لتحرك السيارة إلى الأمام.

تستطيع الأجسام الساكنة التأثير بقوة (بسبب ليونتها)

وغالبا ما نميل إلى ربط القوى المؤثرة بالأجسام النشطة فقط. مثل الإنسان والحيوان والآلات. أو الأجسام المتحركة مثل المطرقة. وليس من السهولة أن نتخيل جسمًا ساكنًا. كالحائط. أو المكتب. أو حائط حلبة التزلج. يؤثر في الأجسام الأخرى بأيّ قوة (الشكل 4 - 9). والتفسير الوحيد هو أنه مهما كانت المادة صلبة. فهي ستظهر درجة من الليونة إلى حدّ ما. ومثال على ذلك الرباط المطاطي المستطال المؤثر في قطعة من الورق ليجعلها تتسارع في فضاء الغرفة. وأما المواد الأخرى. فقد تكون غير قادرة على الاستطالة الظاهرة مثل الرباط المطاطي. ولكنها في الوقت نفسه ستنضغط أو تتمدد إذا ما تأثرت بقوة ما. ومثلما يؤثر الرباط المطاطي المستطال بقوة. يُؤثر كلّ من المواد الأخرى، الحائط، والمكتب، ومصدّ السيارة نتيجة انضغاطها (أو تمدّدها).

ونستطيع من هذه الأمثلة السابقة المذكورة أعلاه رؤية مدى أهمية أن نتذكر ما الجسم الذي تأثر بالقوة؟ وما الجسم الذي سبب أو أثر بهذه القوة؟ ويظهر مدى تأثير القوة في حركة جسم ما فقط عندما تؤثر فيه.

حل المسألة

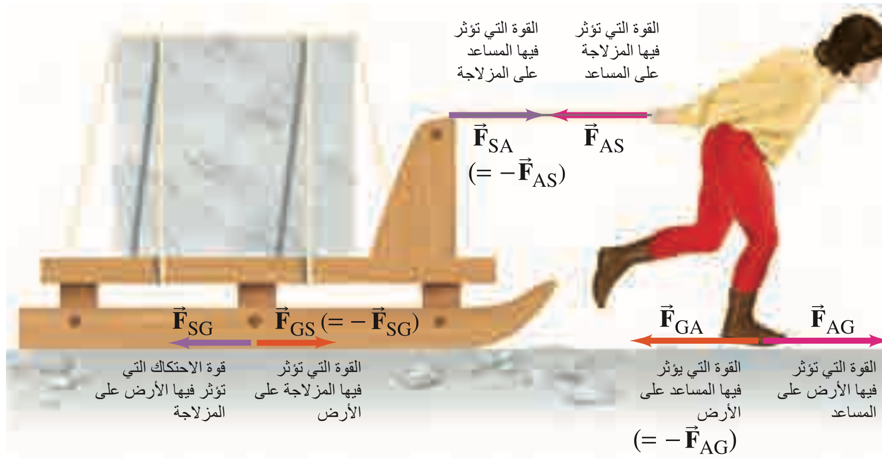
يجب أن يكون واضحاً ما الجسم الذي سيتأثر بها، وما الجسم الذي يُسببها. تنطبق $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ على جميع القوى المؤثرة في جسم ما.

أي أنّ القوة لن تؤثر في حركة أيّ جسم ما لم تكن مؤثرة فيه. ولكي نتفادى أيّ التباس: يجب أن نحدّد ما إذا كان الجسم يؤثر بقوة ما. أو أنه يتأثر بهذه القوة. أو أنّ الجسم يؤثر بقوة في جسم آخر. أم أن الجسم الآخر يؤثر فيه بقوة. ولذلك يُعدّ من الأفضل استخدام الرموز السفلية للتفريق بين الحالتين السابقتين. وعلى سبيل المثال. فإنّ القوة التي تؤثر بها الأرض (Ground) في الشخص(Person) خلال حركته كما في (الشكل 4 - 11) يمكن أن تعطى بـ $\vec{F}_{PG}$. أما القوة التي يؤثر بها الشخص في الأرض فهي $\vec{F}_{GP}$. وعند تطبيق قانون نيوتن الثالث فإنّ لكلٍّ من $\vec{F}_{PG}$ و $\vec{F}_{GP}$ القيمة نفسها. وأما إشارة السالب فهي للتذكير باتجاه القوتين المتعاكسين.

قانون نيوتن الثالث في الحركة

$$\vec{F}_{GP} = -\vec{F}_{PG}. \qquad (2\text{-}4)$$

لاحظ أنّ القوتين الظاهرتين في (الشكل 4 - 11) تؤثران في جسمين مختلفين. وعليه. فقد تم استخدام ألوان مختلفة للدلالة على هاتين القوتين. وهاتان القوتان لن تظهرا معًا أبدًا في حدّ جمع القوى حسب قانون نيوتن الثاني $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$. لماذا؟ السبب ببساطة أنهما تؤثران في جسمين مختلفين : تمثل $\vec{a}$ تسارع أحدهما فقط. لذا. فإنّ $\Sigma\vec{F}$ يجب أن تضم القوى المؤثرة في هذا الجسم المتسارع فقط.



الشكل 4 - 12 (المثال 4 - 5) يظهر القوى الأفقية فقط. اختار مصطفى ذو السبعين عاما مكعبا رائعا من الرخام لمنحوتته التالية. ويظهر في الصورة مساعده وهو يجر الرخام خارج المحجر. وتظهر الأسهم الدالة على القوى المؤثرة في المساعد باللون الأحمر (الأحمر الفاتح). أما الأسهم الدالة على القوى المؤثرة في الزلاجة، فتظهر باللون الأرجواني. ولون الأسهم الدالة على القوة المؤثرة في الأرض برتقالي. وأعطيت قوى الفعل وردّ الفعل المتساوية بالمقدار والمتعاكسة بالاتجاه الرموز السفلية نفسها، ولكن بطريقة معكوسة (مثل $\vec{F}_{GA}$ و $\vec{F}_{AG}$) وتم تمييزها بألوان مختلفة لأنها تؤثر في أجسام مختلفة.

المثال المفاهيمي 4-5 إيضاح القانون الثالث

تم تكليف مساعد مصطفى بمهمة إزاحة مكعب الرخام باستخدام الزلاجة (الشكل 4-12). ولكن المساعد قال لمديره وهو في حيرة من أمره: "كلما أقوم بالتأثير في الزلاجة بقوة إلى الأمام، تؤثر الزلاجة فيَّ بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه إلى الخلف. وعليه، فكيف لي أن أحرّكها من موضعها؟ ومهما حاولت أن أضاعف من قيمة القوة التي أؤثر بها فستكون قيمة ردّ الفعل مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه لتكون محصلة القوى الكلية مساوية للصفر. لذا، لن أستطيع تحريكها أبدا." هل تُعدّ هذه الحالة من الجهل خطيرة. وضح إجابتك؟

← حل المسألة

دراسة قانوني نيوتن الثاني والثالث.

الحل: نعم؛ بالرغم من أنّ الفعل وردّ الفعل متساويان بالمقدار ومتعاكسان بالاتجاه، فإنّ المساعد نسي أنهما يؤثران في جسمين مختلفين. فالقوة الدافعة إلى الأمام (الفعل) هي التي يؤثر بها المساعد في الزلاجة (الشكل 4 - 12) أمّا القوة الدافعة إلى الخلف (رد الفعل) فهي التي تؤثر بها الزلاجة في المساعد. ولكي نحدّد ما إذا كان المساعد سيتحرك أم لا: علينا أن نحدّد القوى المؤثرة في المساعد فقط. ومن ثَمَّ نطبق $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ حيث $\Sigma\vec{F}$ هي محصلة القوى على المساعد وتمثل $\vec{a}$ تسارع المساعد. أما m فهي كتلة المساعد أيضاً. وهناك قوتان تؤثران في حركة المساعد إلى الأمام، كما هو موضح بالأسهم ذات اللون الأحمر الفاتح (الشكلان 4 - 12 و 4 - 15) وهما: (1) القوة الأفقية $\vec{F}_{AG}$. المؤثرة في المساعد بواسطة الأرض (كلما دفع الأرض بشدة إلى الخلف، دفعته الأرض بشدة إلى الأمام – حسب قانون نيوتن الثالث) : (2) القوة $\vec{F}_{AS}$ التي تؤثر بها الزلاجة في المساعد والعاملة على سحبه إلى الخلف، انظر (الشكل 4 - 13). وإذا دفع الأرض بشدة كافية، فستصبح القوة المؤثرة فيها بواسطة الأرض $\vec{F}_{AG}$ أكبر من قوة سحب الزلاجة له إلى الخلف $\vec{F}_{AS}$. وعليه، سيبدأ المساعد بالتسارع إلى الأمام (قانون نيوتن الثاني). وبالمقابل، ستتسارع الزلاجة إلى الأمام عندما تصبح القوة المؤثرة فيها من المساعد أكبر من قوة الاحتكاك المؤثر فيها إلى الخلف بواسطة الأرض (أي أنه عندما تكون $\vec{F}_{SA}$ أكبر من قيمة $\vec{F}_{SG}$ في الشكل 4 - 12).



الشكل 4 - 13 المثال 4 - 5. القوى الأفقية على المساعد

إنّ استخدام رمزين سفليين لتوضيح قانون نيوتن الثالث هو شيء ليس ذا قيمة، وعادة لن يتم استخدامهما بهذه الصورة. ولكن إذا كان لديك أيّ التباس حول أيّ قوة معطاة، فلك حرية استخدام الرمزين السّفليين، لتفرق بين الجسم الذي يتأثر بالقوة من الجسم الذي يؤثر بقوة. وعادة ما نستخدم رمزًا سفليًّا واحدًا لنشير به إلى القوة التي تؤثر في الجسم المعني.

التمرين أ: تصطدم شاحنة ذات كتلة هائلة وجهًا لوجه مع سيارة سباق صغيرة. (أ) أيّ من السيارتين ستشعر أكثر بقوة التصادم الهائلة؟ (ب) أيهما سيتأثر بأعلى تسارع؟ (جـ) أيّ قانون من قوانين نيوتن مفيد أكثر في الوصول إلى الإجابة الصحيحة؟

6-4 الوزن - قوة الجاذبية والقوة العمودية

كما رأينا في الفصل الثاني، ادعى جاليلو أنّ الأجسام القريبة من سطح الأرض التي تسقط باتجاه سطح الأرض جميعها تسقط بالتسارع $\vec{g}$ نفسه عندما يتم إهمال مقاومة الهواء. وتسمى القوة التي تسبب هذا التسارع *قوة الجاذبية الأرضية أو قوة الجاذبية*. و ما الذي يؤثر بقوة الجاذبية؟

إنها الأرض. كما سنناقش في الفصل الخامس، التي تعمل *رأسيًّا نحو الأسفل باتجاه مركز الأرض. دعنا نطبق قانون نيوتن الثاني على جسم ما كتلته m يسقط بتأثير الجاذبية، ونستخدم $\vec{\mathbf{g}}$ بدلالة $\vec{\mathbf{a}}$ للدلالة على التسارع الناتج من الجاذبية نحو الأسفل. وعليه، يمكن كتابة قوة الجاذبية المؤثرة في جسم ما $\vec{\mathbf{F}}_G$ كالتالي:

الوزن = قوة الجاذبية

$$\vec{\mathbf{F}}_G = m\vec{\mathbf{g}} \qquad (3 - 4)$$

واتجاه هذه القوة إلى الأسفل باتجاه مركز الأرض. عادة تدعى قيمة قوة الجاذبية المؤثرة في جسم ما بالوزن.

وباستخدام الوحدات الدولية، $g = 9.80\,\text{m/s}^2 = 9.80\,\text{N/kg}$.** فإنّ وزن كتلة مقدارها $1.00\,\text{kg}$ على الأرض هو $1.00\,\text{kg} \times 9.80\,\text{m/s}^2 = 9.80\,\text{N}$. وسنهتم بأوزان الأجسام على سطح الأرض على نحو عام، مع ملاحظة أنّ هذه الأوزان تختلف فوق سطح القمر والكواكب الأخرى، أو في الفضاء مقارنة بتلك التي قرب سطح الأرض. وعلى سبيل المثال، فإنّ تسارع الجاذبية قرب سطح القمر يعادل سدس التسارع بالقرب من سطح الأرض، وأنّ كتلة تعادل $1.0\,\text{kg}$- ستزن $1.7\,\text{N}$ فقط. وبالرغم من أننا لن نستخدم الوحدات البريطانية، فإنه ولأسباب عملية نجد أنّ كتلة مقدارها $1\,\text{kg}$ تزن حوالي $2.2\,\text{lb}$. (وعلى سطح القمر، فإنّ $1\,\text{kg}$ يزن حوالي $0.4\,\text{lb}$).

تنويه

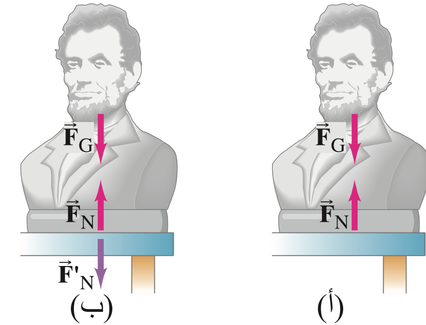
الكتلة مقابل الوزن

ويظهر تأثير قوة الجاذبية في الجسم خلال سقوطه. ونعلم أيضًا أنّ تأثير الجاذبية في الأجسام لا يختفي عندما تكون ساكنة قرب سطح الأرض. وسنحصل على وزن أيّ كتلة ساكنة قرب سطح الأرض باستخدام الميزان الزنبركيّ. وسنجد القوة المؤثرة نفسها في الأجسام والمعطاة في (المعادلة 4-3). ويصبح السؤال الآن: لِمَ لا يتحرك الجسم إذن؟ ومن قانون نيوتن الثاني الذي ينصّ على أنّ محصلة القوى على الجسم الساكن تساوي صفرا نكتشف ضرورة وجود قوة أخرى تؤثر في الجسم الساكن لتعادل تأثير قوة الجاذبية عليه.

قوة تلامس

ولجسم ساكن على طاولة، فإنّ هذه القوة الأخرى ما هي إلا القوة العمودية التي يؤثر بها سطح الطاولة في الجسم إلى الأعلى. انظر (الشكل 4 - 14 أ). وينضغط سطح الطاولة قليلاً أسفل الجسم، ولكن نظرًا لليونته، فإنه يدفع الجسم إلى الأعلى كما هو موضح. وتسمى القوةُ التي تؤثر بها الطاولة نتيجة لظهورها عند تلامس جسمين قوةَ التلامس (وتُعدّ قوة يدك التي تدفع العربة قوة تلامس أيضًا) وعندما تؤثر قوة التلامس عموديًّا على سطح التلامس، تسمى القوةَ العمودية ("العمودية" تعني رأسية في هذه الحالة). وعليه، يرمز إليها بـ $\vec{\mathbf{F}}_N$ في (الشكل 4 - 14أ).

قوة عمودية



الشكل 4 - 14 (أ) محصلة القوى المؤثرة في جسم ساكن تساوي صفرًا حسب قانون نيوتن الثاني. ولهذا، فإنّ قوة الجاذبية ($\vec{\mathbf{F}}_G$) المؤثرة إلى الأسفل في الجسم يجب أن تعادل بقوة إلى الأعلى (القوة العمودية $\vec{\mathbf{F}}_N$) تؤثر بها الطاولة في هذه الحالة. (ب) ($\vec{\mathbf{F}}'_N$) القوة التي تتأثر بها الطاولة بواسطة التمثال وهي ردّ الفعل للقوة $\vec{\mathbf{F}}_N$ حسب قانون نيوتن الثالث. تظهر ($\vec{\mathbf{F}}'_N$) بلون مختلف لتذكرنا بأنها تؤثر في جسم مختلف). ولا يظهر في الشكل ردّ الفعل للقوة $\vec{\mathbf{F}}_G$

وتظهر في (الشكل 4 - 14أ) قوتان تؤثر كلتاهما في التمثال الذي يبقى ساكنًا؛ حيث إن محصلة القوتين المتجهة يجب أن تساوي صفرا (قانون نيوتن الثاني). وعليه، فإنّ $\vec{\mathbf{F}}_G$ و $\vec{\mathbf{F}}_N$ يجب أن تتساوى قيمتاهما وتتعاكسان في الاتجاه. ولكن لا تُعدّ هاتان القوتان المتساويتان في المقدار والمتعاكستان في الاتجاه هما ما تحدث عنهما نيوتن في قانونه الثالث. وأنّ قوة الفعل وردّ الفعل في قانون نيوتن الثالث تؤثران في جسمين مختلفين، في حين تؤثر القوتان الظاهرتان في (الشكل 4 - 14أ) في الجسم نفسه. ونستطيع أن نسأل لكلّ قوة ظاهرة في (الشكل 4 - 14أ):"ما قوة ردّ الفعل؟" والقوة $\vec{\mathbf{F}}_N$ المؤثرة في التمثال إلى الأعلى هي ناتجة من الطاولة. وردّ الفعل لهذه القوة هي القوة التي يؤثر بها التمثال في الطاولة إلى الأسفل. وهي موضحة في (الشكل 4 - 14 ب)، وقد أعطي لها الرمز $\vec{\mathbf{F}}'_N$. وهذه $\vec{\mathbf{F}}'_N$ القوة التي يؤثر بها التمثال في الطاولة هي ردّ الفعل على $\vec{\mathbf{F}}_N$ حسب قانون نيوتن الثالث. أمّا الآن، $\vec{\mathbf{F}}_G$ فما قوة ردّ الفعل على القوة الأخرى المؤثرة في التمثال؛ أي ردّ الفعل على قوة الجاذبية التي تؤثر بها الأرض فيه؟ فهل تستطيع أن تخمن ذلك؟ سنرى في الفصل الخامس أنّ ردّ الفعل هو أيضا قوة جاذبية يؤثر بها التمثال في الأرض.

تنويه

لا يُعدّ الوزن والقوة العامودية زوجاً من الفعل ورد الفعل

* تم ربط مبدأ "الرأسي" بالجاذبية. ويُعدّ أفضل تعريف رأسي هو اتجاه سقوط الأجسام. وعلى الوجه الآخر، فإن السطح "الأفقي" هو السطح الذي لن يبدأ جسم كروي بالتدحرج فوقه : أي أن الجاذبية لن يكون لها أي تأثير. والأفقي عمودي على الرأسي.

** بما أن $1\,\text{N} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$ (البند 4 - 4)، $1\,\text{m/s}^2 = 1\,\text{N/kg}$.

المثال 4-6 الوزن والقوة العمودية وصندوق:

أهداك صديقك صندوقًا كتلته $10.0\ kg$ وفي داخله هدية سرّيّة. الصندوق ساكن على سطح طاولة أملس (مهمل الاحتكاك) أفقي (الشكل 4 - 15 أ). (أ) حدّد وزن الصندوق والقوة العمودية المؤثرة فيه بواسطة الطاولة. (ب) حدّد القوة العمودية التي يؤثر بها سطح الطاولة في الصندوق بعد أن يدفع صديقك الصندوق بقوة $40.0\ N$ إلى الأسفل كما في (الشكل 4 - 15 ب). (جـ) ما القوة العمودية المؤثرة في الصندوق من سطح الطاولة إذا سحب صديقك الصندوق إلى الأعلى بقوة $40.0\ N$ (الشكل 4 - 15 جـ)؟

النهج: الصندوق ساكن على الطاولة. وعليه، فإنّ محصلة القوى على الصندوق في كلّ حالة تساوي صفرًا (قانون نيوتن الثاني). ويعادل وزن الصندوق mg في الحالات الثلاث جميعها.

الحـل: (أ) إنّ وزن الصندوق هو $mg = (10.0\,kg)(9.80\,m/s^2) = 98.0\,N$ وتؤثر هذه القوة إلى الأسفل. وأما القوة الأخرى الوحيدة المؤثرة في الصندوق فهي القوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق إلى الأعلى، كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 أ). ونختار الاتجاه إلى أعلى على أنه الاتجاه الصّادي الموجب. لذا، فإنّ محصلة القوى ΣF_y على الصندوق هي $\Sigma F_y = F_N - mg$. وبما أنّ الصندوق ساكن، فإنّ محصلة القوى المؤثرة فيه يجب أن تعادل صفرا (قانون نيوتن الثاني، $\Sigma F_y = ma_y$ و $a_y = 0$). وعليه فإنّ

$$\Sigma F_y = F_N - mg = 0,$$

ونحصل في هذه الحالة على

$$F_N = mg$$

وتصبح القوة العمودية على الصندوق، التي تؤثر بها الطاولة $98.0\ N$ إلى الأعلى وتعادل قيمتها وزن الصندوق.

(ب) بما أنّ الصديق يضغط على الصندوق بقوة $40.0\ N$ إلى الأسفل، فإنّ الصندوق سيتأثر الآن بثلاث قوى بدلاً من اثنتين كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 ب). ولا يزال وزن الصندوق $mg = 98.0\,N$. ومحصلة القوة عليه هي $\Sigma F_y = F_N - mg - 40.0\,N$ وتعادل الصفر؛ لأنّ الصندوق لا يزال ساكنًا. وعليه، بما أنّ $a = 0$ فإنّ قانون نيوتن الثاني سيعطي:

$$\Sigma F_y = F_N - mg - 40.0\,N = 0$$

ونحلّ هذه المعادلة لإيجاد القوة العمودية :

$$F_N = mg + 40.0\,N = 98.0\,N + 40.0\,N = 138.0\,N$$

وهي أكبر من تلك في (أ). وستدفع الطاولة بقوة أكبر في الاتجاه المعاكس عندما يؤثر شخص في الصندوق إلى الأسفل؛ أي أنّ القوة العمودية ليست دائما معادلة للوزن.

(جـ) ما يزال وزن الجسم يساوي $98.0N$ ويؤثر إلى الأسفل. وتؤثر كلّ من القوة العمودية والقوة التي يؤثر بها صديقك في الصندوق إلى الأعلى (الاتجاه الموجب) كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 جـ). ولكن الصندوق لا يتحرك من موضعه؛ حيث إن قوة صديقك المؤثرة إلى الأعلى أقلّ من الوزن. وعليه، فإنّ محصلة القوى على الصندوق ستعود إلى الصفر مرة أخرى حسب قانون نيوتن الثاني؛ لأنّ $a = 0$:

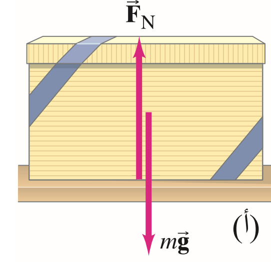
$$\Sigma F_y = F_N - mg - 40.0\,N = 0$$

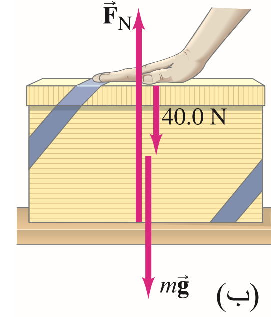
و عليه

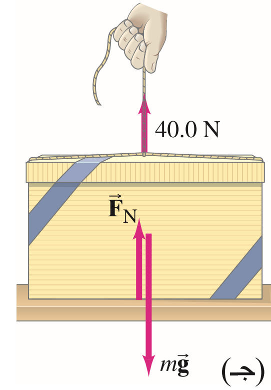
$$F_N = mg - 40.0\,N = 98.0\,N - 40.0\,N = 58.0\,N$$

أي أنّ الطاولة لا تدفع إلى الأعلى بقوة ضد الوزن الكامل للصندوق، بسبب قوة السحب التي يؤثر بها الصديق إلى الأعلى.

ملحوظة: لا يتغير وزن الصندوق $(= mg)$ سواء دفع الصديق الصندوق أم سحبه. والقوة الوحيدة التي ستتأثر هي القوة العمودية.







الشكل 4 - 15 (المثال 4 - 6) (أ) يركد صندوق هدايا ساكنا كتلته $10\text{-}kg$ على طاولة. (ب) يضغط شخص إلى الأسفل على الصندوق بقوة $40.0N$. (جـ) يسحب شخص الصندوق إلى الأعلى بقوة $40.0N$. يظهر تأثير القوى جميعها على امتداد خطّ واحد، علماً بأنها أزيحت جانبا خلال رسمها لتسهيل تمييزها عن بعضها بعضًا. وتم إظهار القوى المؤثرة في الصندوق فقط.

تذكر أنّ القوة العمودية هي مرنة في الأصل (تنثني الطاولة قليلاً في (الشكل 4 - 15) أسفل وزن الصندوق). والقوة العمودية في (المثال 4 - 6) هي رأسية وعمودية على سطح الطاولة الأفقي. ومع هذا، فإنّ القوة العمودية ليست رأسية دائمًا؛ فعندما تدفع حائطًا عموديًا على سبيل المثال، فإنّ الحائط يدفعك في الاتجاه المعاكس بقوة عمودية في الاتجاه الأفقي. وبالنسبة إلى جسم موضوع على سطح يميل بزاوية ما عن الأفقي، مثل المتزلج أو سيارة فوق تلّة، فإنّ القوة العمودية تؤثر عموديًا في السّطح؛ أي أنّها لا تكون رأسيّة.

تنويه !

ليس من الضروري أن تتساوى القوة العمودية مع الوزن.

تنويه !

ليس من الضروري أن تكون القوة العمودية $\vec{F}_N$ رأسية.

المثال 4-7 تسريع صندوق

ماذا يحدث لو أنّ شخصًا سحب الصندوق إلى الأعلى في (المثال 4 - 6 جـ) بقوة تعادل وزن الصندوق أو أكبر منه. وعلى سبيل المثال $F_P = 100.0\,\text{N}$ بدلاً من 40.0N الظاهر في (الشكل 4 - 15 جـ)؟

النهج: نستطيع أن نبدأ الحلّ تماما. كما في (المثال 4 - 6). ولكن كن مستعدا لمفاجأة .

الحـــــلّ: إنّ القوى المحصلة على الصندوق هي:

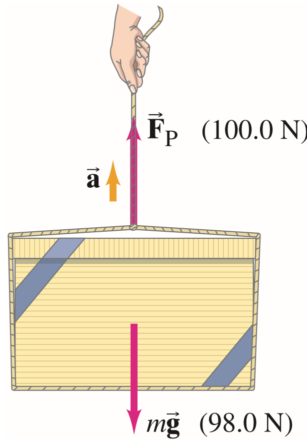
$$\Sigma F_y = F_N - mg + F_P$$
$$= F_N - 98.0\,\text{N} + 100.0\,\text{N}$$

وإذا عمدنا إلى مساواة المعادلة السابقة بالصفر (على اعتقاد أنّ التسارع يساوي صفرًا) فسنحصل على $F_N = -2.0\,\text{N}$. وهذا كلام غير منطقي؛ لأنّ الإشارة السالبة توحي بأنّ اتجاه F_N إلى الأسفل. ومن الطبيعي ألا تستطيع الطاولة سحب الصندوق إلى هذا الاتجاه (إلا إذا كان الصندوق مصمغًا في الطاولة). وأقلّ مقدار ممكن لـ F_N هو الصفر وهو ما يبدو في هذه الحالة. إنّ حقيقة ما سيحدث للصندوق هو أنه سيتسارع إلى الأعلى؛ لأنّ محصلة القوى عليه في هذا الاتجاه لا تساوي صفرا. ومحصلة القوة على الصندوق (بعد وضع القوة العمودية $F_N = 0$) هي:

$$\Sigma F_y = F_P - mg = 100.0\,\text{N} - 98.0\,\text{N}$$
$$= 2.0\,\text{N}$$

إلى الأعلى. انظر (الشكل 4 - 16). عند تطبيق قانون نيوتن الثاني، سنرى أنّ الصندوق سيبدأ بالتسارع إلى الأعلى:

$$a_y = \frac{\Sigma F_y}{m} = \frac{2.0\,\text{N}}{10.0\,\text{kg}}$$
$$= 0.20\,\text{m/s}^2$$



الشكل 4 - 16 (المثال 4-7). يتسارع الصندوق إلى الأعلى لأنّ $F_P > mg$.

مثال إضافيّ:

المثال 4-8 الوزن الظّاهريّ الضائع

تهبط امرأة كتلتها 65-kg في مصعد يتسارع بهدوء إلى الأسفل بمعدل 0.20 g. وهي تقف على ميزان قراءاته بدلالة kg. (أ) ما وزن المرأة؟ وما قراءة الميزان؟ (ب) ما قراءة الميزان عندما يهبط المصعد بسرعة ثابتة تساوي 2.0 m/s؟

النهج: يظهر (الشكل 4 – 17) القوة المؤثرة جميعها في المرأة (وفقط تلك القوى المؤثرة فيها) . واتجاه التسارع إلى الأسفل، وهو الاتجاه الذي سنتخذه موجبا.

الحل: (أ) من قانون نيوتن الثاني

$$\Sigma F = ma$$
$$mg - F_N = m\,(0.20g).$$

ونحلّ المعادلة لإيجاد F_N :

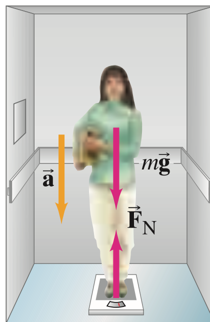
$$F_N = mg - 0.20mg = 0.80mg,$$

وهي تؤثّر إلى الأعلى. والقوة العمودية $\vec{F}_N$ هي القوة التي يؤثر بها الميزان في الشخص، وهي مساوية للقوة التي تؤثر بها في الميزان. ومعاكسة لها: $F'_N = 0.80mg$ إلى الأسفل ولا يزال وزنها (قوة الجاذبية عليها) ثابتا: $mg = (65\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 640\,\text{N}$ ولكن الميزان يؤثر بقوة تساوي 0.80 mg وستظهر عليه قراءة مقدارها $0.80m = 52\,\text{kg}$.

(ب) والآن، لا يوجد تسارع؛ حيث $a = 0$. ووفق قانون نيوتن الثاني، فإنّ $mg - F_N = 0$ و $F_N = mg$. وسيقرأ الميزان الكتلة الحقيقية وهي 65kg.

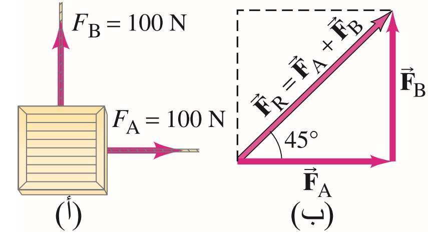
ملحوظة: مع أنّ قراءة الميزان في (أ) هي 52 kg (ككتلة ظاهرية)، إلاّ أنّ الكتلة الحقيقية لا تتغير نتيجة التسارع وتبقى 65 kg.

الشكل 4 - 17 (المثال 4 - 8).



7-4 حلّ المسائل باستخدام قوانين نيوتن مخططات الجسم الحرّ

يخبرنا قانون نيوتن الثالث بأنّ تسارع جسم ما يتناسب طرديا مع محصلة القوى المؤثرة فيه. والقوة المحصلة كما تم ذكرها سابقًا هي الجمع المتجه للقوى المؤثرة جميعها في الجسم. وبالفعل، أظهرت التجارب العديدة بأنّ القوى تجمع مع بعضها بعضًا كمتجهات تخضع بالتمام للقوانين التي تم تطويرها في الفصل الثالث. فعلى سبيل المثال، في (الشكل 4 - 18). تظهر قوتان متساويتان بالمقدار (كلّ منهما $100\ \text{N}$) تؤثران في جسم، وتصنعان زاوية مقدارها 90° بالنسبة إلى بعضها بعضًا. ومن البديهي أن نرى الجسم يبدأ بالتحرك بزاوية 45°. وهذا نتيجة تطبيق قوانين جمع المتجهات. وبالرجوع إلى نظرية فيثاغورس، فإنّ قيمة محصلة القوى هي: $F_R = \sqrt{(100\ \text{N})^2 + (100\ \text{N})^2} = 141\ \text{N}$



الشكل 4 - 18 (أ) تؤثر قوتان؛ $(\vec{F}_A)$ و- $(\vec{F}_B)$ - ناتجتان من عاملين A وB في صندوق شحن. (ب) محصلة $(\vec{F}_A)$ و$(\vec{F}_B)$ - هي $(\vec{F}_R)$.

المثال 4-9 جمع متجهات القوة.

احسب مجموع القوتين المؤثرتين في القارب بواسطة العاملين A و B كما في (الشكل 4-19 أ).

النهج: نجمع متجهات القوة كأيّ متجهات أخرى كما تم عرضها في الفصل الثالث. والخطوة الأولى هي اختيار نظام إحداثي xy كما في (الشكل $4 - 19$ أ). ومن ثَمّ تحليل المتجهات إلى مركباتها.

الحلّ: يظهر متجهها القوة وقد تم تحليلهما إلى مركبتيهما في (الشكل $4 - 19$ ب). ونجمع القوى باستخدام طريقة المركبات. فمركبات $(\vec{F}_A)$ هي :

$$F_{Ax} = F_A \cos 45.0^{\circ} = (40.0\ \text{N})(0.707) = 28.3\ \text{N},$$
$$F_{Ay} = F_A \sin 45.0^{\circ} = (40.0\ \text{N})(0.707) = 28.3\ \text{N}.$$

ومركبات $\vec{F}_B$ هي

$$F_{Bx} = +F_B \cos 37.0^{\circ} = +(30.0\ \text{N})(0.799) = +24.0\ \text{N},$$
$$F_{By} = -F_B \sin 37.0^{\circ} = -(30.0\ \text{N})(0.602) = -18.1\ \text{N}.$$

و F_{By} سالبة؛ لأنها تشير إلى الاتجاه السالب للمحور الصادي. ومركبات محصلة القوى هي (انظر الشكل 4 - 19 جـ):

$$F_{Rx} = F_{Ax} + F_{Bx} = 28.3\ \text{N} + 24.0\ \text{N} = 52.3\ \text{N},$$
$$F_{Ry} = F_{Ay} + F_{By} = 28.3\ \text{N} - 18.1\ \text{N} = 10.2\ \text{N}.$$

ولإيجاد قيمة محصلة القوى، نستخدم نظرية فيثاغورس:

$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} = \sqrt{(52.3)^2 + (10.2)^2}\ \text{N} = 53.3\ \text{N}.$$

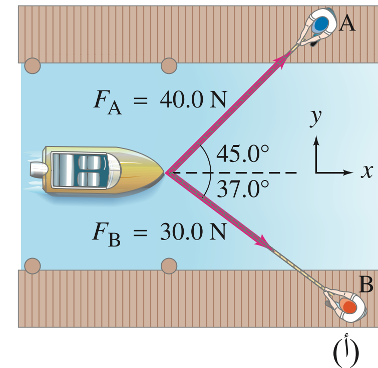
ويبقى السؤال الوحيد عن الزاوية التي تصنعها محصلة القوى $\vec{F}_R$ مع اتجاه المحور السيني.

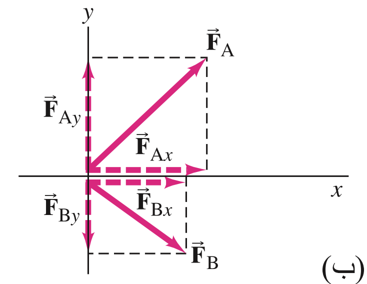
ونستخدم :

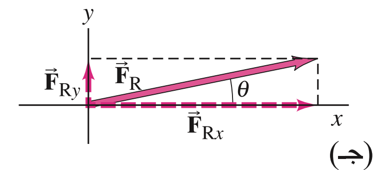
$$\tan\theta = \frac{F_{Ry}}{F_{Rx}} = \frac{10.2\ \text{N}}{52.3\ \text{N}} = 0.195$$

وعليه، فإنّ $\tan^{-1}(0.195) = 11.0^{\circ}$. وبذلك تكون قيمة محصلة القوى المؤثرة في القارب $53.3\ \text{N}$ وتؤثر بزاوية 11.0° فوق المحور السيني.

الشكل 4– 19 (المثال 4 - 9): متجها قوة يؤثران في قارب





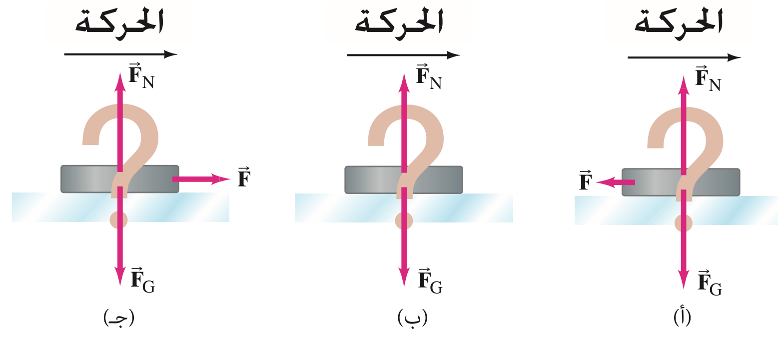


وعند حلّ مسائل تضم قوانين نيوتن، فمن الأهمية رسم مخطط يظهر القوى المؤثرة جميعها في كلّ جسم على حدة. ويسمّى هذا المخطّط **مخطّط الجسم الحرّ أو مخطّط القوى**: اختر جسمًا واحدًا، ومن ثم ارسم سهمًا للدلالة عل كلّ قوة تؤثر فيه. ومثل القوى المؤثرة في الجسم جميعها. ولا تظهر القوة التي يؤثر فيها الجسم المعني في الأجسام الأخرى. وللمساعدة في التعرف وتحديد القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها؛ اسأل نفسك: ما الأجسام الأخرى التي يمكن أن تؤثر فيه. وإذا كانت المسألة تضمّ أكثر من جسم، فإنك ستكون بحاجة إلى مخطط جسم حرّ لكلّ جسم على حدة.

حل المسألة

مخطط جسم- حرّ

تعريف كلّ قوة



الشكل 4 - 20 (المثال 4 - 10).
أيّ مخطط من مخططات الجسم الحر لقرص الهوكي المنزلق على سطح أملس هو الصحيح؟

المثال المفاهيمي 4-10 قرص الهوكي

ينزلق قرص الهوكي بسرعة ثابتة على سطح ثلجيّ أفقيّ أملس مهمل الاحتكاك. أيّ من المخططات في (الشّكل 4 – 20) يُعدّ مخطط الجسم – الحرّ الصحيح للقرص؟ وما إجابتك عندما يبدأ القرص بالإبطاء؟

الحل: هل اخترت (أ)؟ إذا كانت إجابتك نعم، فهل تستطيع إجابة السؤال: ما الذي يؤثر بالقوة الأفقية $\vec{F}$ في القرص؟ وإذا كانت الإجابة بأنّها القوة الضرورية للإبقاء على الحركة، فاسأل نفسك: ما الذي يؤثر في هذه القوة؟ وتذكر بضرورة وجود جسم آخر ليؤثر بقوة ما ولا يوجد أيّ احتمال لذلك هنا. وعليه، فإنّ (أ) إجابة خطأ. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ القوة $\vec{F}$ في (الشكل 4 – 20أ) ستسبّب تسارعًا حسب قانون نيوتن الثاني. لذا، فإنّ الإجابة الصحيحة هي (ب) طالما لا يوجد هناك أيّ احتكاك. ولا توجد محصلة قوة تؤثر في القرص وينزلق القرص بسرعة ثابتة فوق السّطح الثلجيّ.

وعلى أرض الواقع، فإنّ أيّ سطح ثلجيّ أملس مهما كان يؤثر بقوة احتكاك مهما صغرت. ولهذا، فإنّ (جـ) هي الإجابة الصحيحة. وتشير قوة الاحتكاك هذه المتناهية في الصغر إلى عكس اتّجاه الحركة لتتناقص سرعة القرص ببطء شديد.

ونعرض الآن ملخصًا مختصرًا لطريقة حلّ المسائل المتعلقة بقوانين نيوتن.

طريقة حل المسائل **قوانين نيوتن ومخططات الأجسام الحرة**

1. **ارسم مخططًا** للحالة.
2. ادرس كل جسم على حدة، ثمّ ارسم **مخطط جسم حر** لهذا الجسم على حدة مظهراً القوى جميعها المؤثرة في الجسم متضمنًا القوى المجهولة جميعها التي يجب أن تحددها. ولا تظهر أي قوة يؤثر بها هذا الجسم في الأجسام الأخرى. ارسم سهمًا لكل قوة بدقة متناهية ليعكس قيمتها واتجاهها. وارمز لكل قوة بدلالة مصدر هذه القوة، سواء كانت الجاذبية أو الشخص أو الاحتكاك، وهكذا دواليك. وإذا كان النظام يتكون من عدة أجسام، فارسم مخطط جسم – حر لكل منهم على حدة، موضحاً القوى المؤثرة جميعها في كل جسم (القوى المؤثرة فيها فقط). ويجب أن تكون واضحًا لكل قوة: ما القوة التي تؤثر في أي جسم؟ وما الجسم الذي يؤثر في هذه القوة؟ ويمكن ضم القوى التي تؤثر في جسم ما في المعادلة $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ لذلك الجسم.
3. يتضمن قانون نيوتن الثاني متجهات، وعليه فمن الضروري تحليل هذه المتجهات إلى مركباتها. **واختيار** المحاور السينية والصادية بأفضل طريقة لتسهيل العمليات الحسابية. وعلى سبيل المثال، غالباً ما يتم اختصار الوقت عند اختيار أحد المحاور باتّجاه التسارع.
4. **طبق قانون نيوتن الثاني** لكل جسم على حدة في الاتّجاهين السيني والصادي. أي اربط المركبة السينية لمحصلة القوة بمركبة التسارع في الاتّجاه السيني حسب المعادلة التالية $\Sigma F_x = ma_x$، واكمل الحل بالنسبة إلى المركبة الصادية بالمثل تمامًا.
5. **حل** المعادلة أو المعادلات لإيجاد المجاهيل.

وعليك عدم التعامل مع هذه التعليمات لحلّ المسائل على أنها وصفة سحرية. ولكنها ملخّص للأمور الواجب عملها لدفعك إلى التفكير في الاتجاه الصحيح لحلّ السؤال.

وضع سهم قوة على المخططات

وعندما نهتم بالحركة الانتقالية، نرسم القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها وكأنها تؤثر في مركز الجسم؛ أي أننا نتعامل مع الجسم وكأنه نقطي. وهذا الاعتبار لن يكون صحيحًا إذا كان السؤال يحتوي على حركة دورانية أو على اتزان سكونيّ؛ لأنه في هاتين الحالتين يكون موضع تأثير القوة مهمًا جدّا كما سنرى في الفصلين الثّامن والتّاسع.

وسنفترض في الأمثلة التالية أنّ السّطوح جميعها ملساء لدرجة يمكن عندها إهمال أيّ احتكاك. (تمّ مناقشة الاحتكاك والأمثلة المحتوية عليه في البند 4 – 8).

المثال 4-11 سحب صندوق العجائب

افرض أنّ زميلتك طلبت إليك أن تفحص الصندوق (كتلته = 10.0-kg) الذي حصلت عليه (المثال 4 –6 الشكل 4 – 15) لتخمين ما في داخله. فأجبتها: "لا مانع لديّ. اسحبي الصندوق باتجاهك". لتسحب الصندوق باتجاهها بواسطة الحبل المثبت فيه، كما هو مبين في (الشكل 4– 21 أ) فوق سطح الطاولة الأملس. إذا كانت قوة السحب المؤثرة في الصندوق $F_P = 40.0\text{ N}$. وكان خط عملها يميل بزاوية $30.0°$ كما هو موضح، فاحسب: (أ) تسارع الصندوق. (ب) قيمة القوة العمودية F_N التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق. وأهمل الاحتكاك.

النهج: سنتبع تعليمات حلّ المسائل كما وردت في الصفحة السابقة

الحل:

1. ارسم مخططًا سريعًا: الحالة موضحة في (الشكل 4 – 21 أ) وهي تظهر الصندوق والقوة المؤثرة فيه من الشّخص F_P.

2. مخطط الجسم الحرّ: يظهر (الشكل 4 – 21 ب) مخطط الجسم الحرّ للصندوق. ولرسمه بطريقة صحيحة؛ تم إظهار القوى المؤثرة جميعها في الصندوق. وهي القوى المؤثرة فيه فعليًا فقط. وهي قوة الجاذبية $m\vec{g}$. والقوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة $\vec{F}_N$. والقوة التي يؤثر بها الشخص $\vec{F}_P$. وبما أننا مهتمّون بالحركة الانتقالية فقط. فسنظهر القوى الثلاث وكأنها تؤثر في نقطة واحدة، كما في (الشكل 4 - 21 جـ).

3. اختيار المحاور وتحليل المتجهات: بما أننا نتوقع أن تكون الحركة أفقية، فسنعمل على اختيار المحور السّينيّ أفقيًا والمحور الصّادي عموديًا.

وعليه، فإنّ مركبات قوة السحب (40.0 N) هي :

$$F_{Px} = (40.0\text{ N})(\cos 30.0°) = (40.0\text{ N})(0.866) = 34.6\text{ N},$$
$$F_{Py} = (40.0\text{ N})(\sin 30.0°) = (40.0\text{ N})(0.500) = 20.0\text{ N}.$$

أما مركبات القوى $\vec{F}_N$ و $m\vec{g}$ في الاتجاه السّينيّ الأفقيّ فتساوي صفرًا. لذا، فإنّ المركبة الأفقية لمحصلة القوة هي F_{Px}.

4. (أ) **طبّق قانون نيوتن الثاني** لتحدّد المركبة السّينية (باتجاه x) للتسارع:

$$F_{Px} = ma_x$$

5. (أ) **حـل:**

$$a_x = \frac{F_{Px}}{m} = \frac{(34.6\text{ N})}{(10.0\text{ kg})} = 3.46\text{ m/s}^2$$

ولهذا، فإنّ تسارع الصندوق هو 3.46 m/s^2 إلى اليمين.

(ب) والآن، سنحاول إيجاد F_N .

4. (ب) **طبّق قانون نيوتن الثاني** في الاتجاه الصّاديّ (y) مع اعتبار الموجب إلى الأعلى:

$$\Sigma F_y = ma_y$$
$$F_N - mg + F_{Py} = ma_y$$

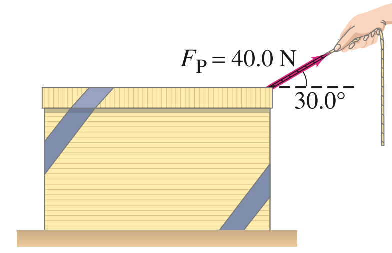
5. (ب) **حـلّ:** نحسب الوزن $mg = (10.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = 98.0\text{ N}$ ومن الخطوة الثالثة أعلاه: $F_{Py} = 20.0\text{ N}$. وبما أنّ $F_{Py} < mg$. فإنّ الصندوق لن يتحرك رأسيًا، لذلك $a_y = 0$. وعليه

$$F_N - 98.0\text{ N} + 20.0\text{ N} = 0$$

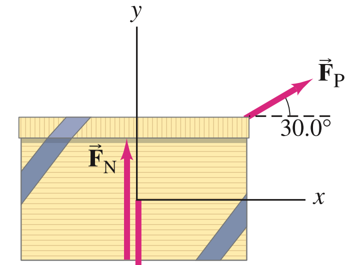
أي:

$$F_N = 78.0\text{ N}$$

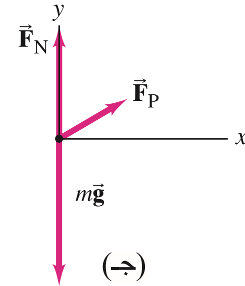
ملحوظة : بما أنّ F_N أقلّ من الوزن، فإنّ الطاولة لن تدفع الصندوق الكلّيّ إلى الأعلى؛ بسبب تأثير سحب الشّخص للصندوق إلى الأعلى.



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل 4 - 21 (أ) سحب الصندوق، (المثال 4 - 11). (ب) مخطط الجسم - الحرّ للصّندوق. (جـ) مخطط الجسم - الحرّ، مفترضا أنّ القوى جميعها تؤثر في نقطة واحدة (للحركة الانتقالية فقط وهو ما نتعامل معه الآن).

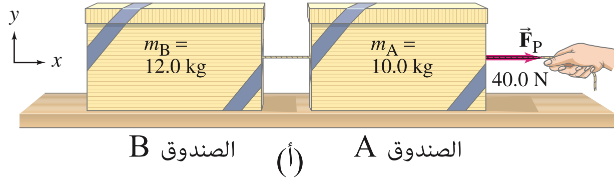
الشّدّ في حبل مطاوع

عندما يسحب حبل مطاوع جسمًا ما، يقال بأنّ هذا الحبل خاضع **للشّدّ**. وأنّ القوة التي يؤثر بها الحبل في الجسم هي الشّدّ F_T. وعندما يكون الحبل مهمل الكتلة، فإنّ القوة التي يؤثر بها قرب أحد طرفيه تنتقل بلا أيّ اضمحلال إلى الأجزاء المجاورة للحبل جميعها وعلى امتداده حتى طرفه الآخر. لماذا؟ لأنّ $\Sigma\vec{F} = m\vec{a} = 0$ للحبل إذا كانت كتلته تساوي الصفر (أو مهملة) بغض النظر عمّا هي $\vec{a}$.

وعليه، فإنّ القوى التي تسحب الحبل من أقصى طرفيه ستلغي بعضها بعضًا (F_T و $-F_T$). لاحظ أنّ الحبال المطاوعة قادرة على السّحب فقط، وهي لا تستطيع أن تدفع بسبب انحنائها.

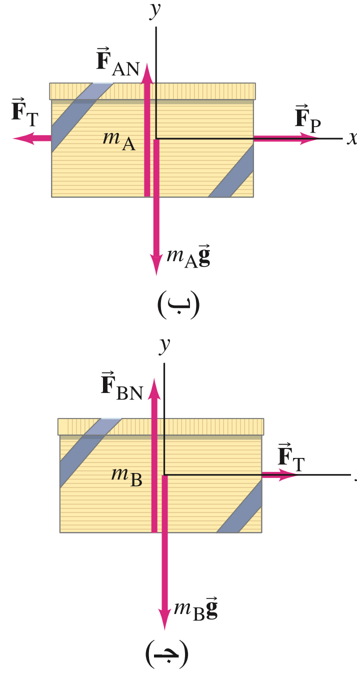
حل المسألة

تستطيع الحبال أن تسحب لا أن تدفع، يظهر الشّدّ على امتداد الحبل.



الشكل 4 - 22 (المثال 4 - 12). (أ) رُبِطَ الصّندوقان A و B أفقيًا بواسطة حبل. ويسحب شخص الصندوق A أفقيًا بقوة $F_P = 40.0\,\text{N}$. (ب) مخطط الجسم الحرّ للصندوق A. (جـ) مخطط الجسم الحرّ للصندوق B.

يتعلق المثال التالي بصندوقين تمّ ربطهما بحبل. ونستطيع أن نشير إليهما كنظام. فالنظام هنا هو أيّ مجموعة مكونة من جسم أو عدة أجسام نختارها للدراسة.



المثال 4-12 **صندوقان يرتبطان بحبل:** رُبط الصندوقان A و B بحبل خفيف الوزن. ووضعا على طاولة ملساء (عديمة الاحتكاك). وكانت كتلتا الصّندوقين 12.0 kg و 10.0 kg على الترتيب. تمّ التأثير في الصندوق ذي الكتلة 10.0-kg بقوة أفقية F_P مقدارها 40.0 N كما هو موضح في (الشكل 4 – 22 أ). أوجد: (أ) تسارع كلّ من الصندوقين. (ب) الشّدّ في الحبل الذي يربط الصّندوقين.

النهج: سنسرّع النهج لأنّنا لن نذكر خطوات الحلّ بالتفصيل كما فعلنا في الأمثلة السابقة وبما أنّ النظام يتكون من صندوقين (أي جسمين). فإنّنا بحاجةٍ إلى رسم مخطط جسم – حرّ لكلّ منهما على حدة. ولرسمهما بالصورة الصحيحة؛ يجب أن نحدد القوى المؤثرة في كلّ منهما. ثم نطبق قانون نيوتن الثاني لكلّ جسم منفرد. يؤثر الشخص بقوة F_P في الصندوق A. في حين يؤثر الصندوق A بقوة F_T في حبل الربط. ويؤثر حبل الربط بقوة معاكسة ومساوية بالقيمة لـ F_T في الصندوق A (قانون نيوتن الثالث). يوضح (الشكل 4 – 22 ب) هاتين القوتين الأفقيتين المؤثرتين في الصندوق A. بالإضافة إلى قوة الجاذبية $m_A\vec{g}$ إلى الأسفل والقوة العمودية $\vec{F}_{AN}$ التي تؤثر بها الطاولة إلى الأعلى. سوف نهمل كتلة الحبل لأنّه خفيف. وعليه. فإنّ الشّدّ عند نهايتي الحبل متساوٍ. ويؤثر الحبل بقوة F_T في الصندوق B. يظهر (الشكل 4 – 22جـ) القوتين المؤثّرتين في الصندوق B وهما $\vec{F}_T$ و $m_B\vec{g}$، والقوة العمودية $\vec{F}_{BN}$. وبما أنّ الحركة أفقية. فسنختار الاتجاه السّينيّ (x) إلى اليمين.

الحـل: (أ) نطبق $\Sigma F_x = ma_x$ للصندوق A :

$$\Sigma F_x = F_P - F_T = m_A a_A \qquad [\text{الصّندوق } A]$$

ونكتب للصندوق B حيث المركبة الأفقية الوحيدة هي F_T :

$$\Sigma F_x = F_T = m_B a_B \qquad [\text{الصّندوق } B]$$

وبما أنّ الصندوقين متصلان ببعضهما بعضًا. فإنهما سيتسارعان بالمعدل a نفسه طالما بقي الحبل مشدودًا بينهما. وعليه. فإنّ $a_A = a_B = a$. ونستطيع الآن أن نعوض في المعادلتين السابقتين بدلالة الكتلة $m_A = 10.0\,\text{kg}$ والكتلة $m_B = 12.0\,\text{kg}$. ومن ثم نجمعهما للتخلّص من أحد المجهولين (F_T) للحصول على:

$$(m_A + m_B)a = F_P - F_T + F_T = F_P$$

أو

$$a = \frac{F_P}{m_A + m_B} = \frac{40.0\,\text{N}}{22.0\,\text{kg}} = 1.82\,\text{m/s}^2$$

وهذا هو المطلوب.

حلّ بديل: كان بالإمكان الوصول إلى النتيجة السابقة نفسها لو أخذنا من البداية نظامًا واحدًا يتكون من الكتلة $m_A + m_B$ التي تؤثر فيها محصلة قوة أفقية F_P. (إنّ قوى الشد F_T تعدّ قوى داخلية للنظام. وعند جمعها ستلغي بعضها بعضًا كي يكون إسهامُها في محصلة القوى المؤثرة في النظام الكلّيّ صفرًا).

➡ حل المسألة
تحليل بديل

(ب) ومن المعادلة أعلاه للصندوق B ($F_T = m_B a_B$) فإنّ الشّدّ في الحبل هو

$$F_T = m_B a = (12.0\,\text{kg})(1.82\,\text{m/s}^2) = 21.8\,\text{N}$$

وعليه. فإنّ F_T أقل من $F_P (= 40.0\,\text{N})$ كما كان متوقعًا؛ لأنّ F_T تعمل على تسريع m_B فقط.

ملحوظة: قد يتبادر إلى الذهن للوهلة الأولى أنّ القوة F_P التي يؤثر بها الشخص. تؤثر في الصندوقين A و B. ولكن هذا الافتراض غير صحيح؛ حيث تؤثر F_P في الصندوق A فقط. وهي تؤثر في الصندوق B من خلال الشّدّ في الحبل F_T الذي يؤثر في الصندوق B ويسارعه.

تنويه !
استخدم لأيّ جسم القوى المؤثرة فيه فقط حسب المعادلة $\Sigma F = ma$

أمثلة إضافية:

سنقدم الآن أمثلة أخرى محلولة لمساعدتك في التمرن على حل مسائل غاية في التنوع.

المثال 4-13 المصعد والوزن المضاد (آلة آتوود).

يوضح (الشكل 4 – 23 أ) نظاماً معلقاً بواسطة حبل يمر فوق بكرة ويتكون من جسمين. ويشار إليه أحياناً بآلة آتوود. خذ بنظر الاعتبار مصعدًا حقيقيًا (m_E) والوزن المضاد له (m_C). ومن أجل التخفيف من الشغل اللازم بذله بواسطة المحرك لرفع المصعد وإنزاله بأمان، فقد تم جعل الكتلتين متساويتين (m_C و m_E). وعادة نهمل المحرك عند التعامل مع هذا النظام، إضافة إلى افتراضنا بأنّ كتلة الحبل مهملة، وكذلك إهمال أي احتكاك ناتج من البكرة أيضاً. وتُعدّ هذه الافتراضات كافية للتأكيد على أن الشد F_T في الحبل له القيمة نفسها على جانبي البكرة. دع كتلة الوزن المضاد $m_C = 1000\ \text{kg}$. وافرض أن كتلة المصعد وهو فارغ تعادل $850\ \text{kg}$. أما كتلته وهو يحمل أربعة ركاب فهي $m_E = 1150\ \text{kg}$. واحسب عندما تكون: $m_E = 1150\ \text{kg}$:
(أ) تسارع المصعد. (ب) الشد في الحبل.

النهج: سنحتاج هنا أيضا إلى تطبيق قانون نيوتن الثاني لكل جسم على حدة؛ حيث يتكون النظام من جسمين(كتلتين). وتؤثر قوتان في كل جسم هما: قوة الجاذبية إلى الأسفل والشد في الحبل إلى الأعلى ($\vec{\mathbf{F}}_T$). ويظهر (الشكلان 4 –23 ب و جـ) مخططي جسم حر للمصعد (m_E) والوزن المضاد ($m_C g$). وسيتسارع المصعد الأثقل بينهما إلى الأسفل. في حين سيتسارع الوزن المضاد إلى الأعلى. وسيتساوى تسارعهما بالمقدار (نفترض عدم تمدد الحبل). ونحسب الوزن المضاد:
$m_C g = (1000\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 9800\ \text{N}$ وعليه، فإن F_T ستكون أكبر من $9800\ \text{N}$ (لكي تتمكن m_C من التسارع إلى الأعلى). أما بالنسبة إلى المصعد: $m_E g = (1150\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 11{,}300\ \text{N}$، التي يجب أن تكون أكبر من F_T لكي تتسارع m_E إلى الأسفل؛ فـإن حساباتنا يجب أن تعطي F_T بين القيمتين $9800\ \text{N}$ و $11{,}300\ \text{N}$.

الحـل: (أ) نطبق قانون نيوتن الثاني للحصول على F_T، وكذلك على التسارع a: $\Sigma F = ma$ لكل جسم على حدة. ونختار الاتجاه الموجب إلى الأعلى (y) لكلا الجسمين. وعليه، فإن $a_C = a$ و $a_E = -a$ حيث تتسارع m_C إلى الأعلى، وتتسارع m_E إلى الأسفل.

وعليه

$$F_T - m_E g = m_E a_E = -m_E a$$
$$F_T - m_C g = m_C a_C = +m_C a$$

ونستطيع أن نطرح المعادلة الأولى من الثانية لنحصل على:

$$(m_E - m_C)g = (m_E + m_C)a$$

حيث a هي المجهول الوحيد، نحل المعادلة لإيجاد قيمة a

$$a = \frac{m_E - m_C}{m_E + m_C}\, g = \frac{1150\ \text{kg} - 1000\ \text{kg}}{1150\ \text{kg} + 1000\ \text{kg}}\, g = 0.070\, g = 0.68\ \text{m/s}^2$$

ويتسارع المصعد (m_E) إلى الأسفل (ويتسارع الوزن المضاد m_C إلى الأعلى) بمعدل:

$$a = 0.070g = 0.68\ \text{m/s}^2$$

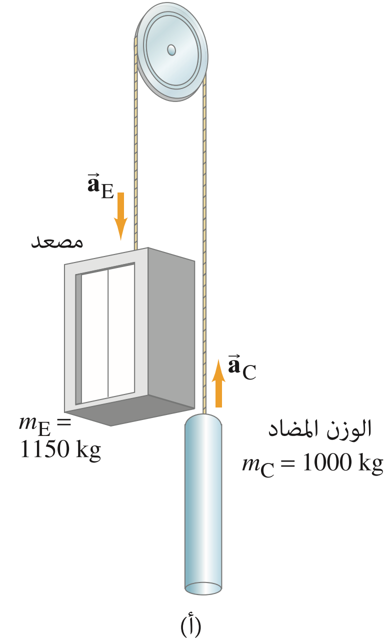
(ب) يمكن الحصول على الشد في الحبل F_T باستخدام إحدى المعادلتين $\Sigma F = ma$، وبالتعويض عن قيمة $a = 0.070g = 0.68\ \text{m/s}^2$.

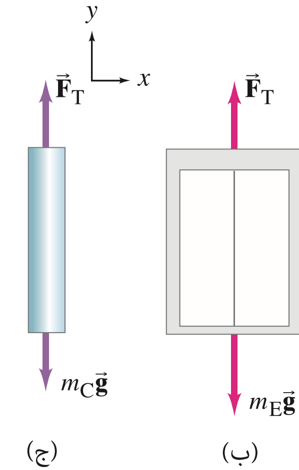
$$F_T = m_E g - m_E a = m_E(g - a)$$
$$= 1150\ \text{kg}\,(9.80\ \text{m/s}^2 - 0.68\ \text{m/s}^2) = 10{,}500\ \text{N},$$
$$F_T = m_C g + m_C a = m_C(g + a)$$
$$= 1000\ \text{kg}\,(9.80\ \text{m/s}^2 + 0.68\ \text{m/s}^2) = 10{,}500\ \text{N},$$

وهي متطابقة. وكما توقعنا، فإن الإجابة تقع بين $9800\ \text{N}$ و $11{,}300\ \text{N}$.

ملحوظة: نستطيع التأكد من المعادلة g لتسارع a في هذا المثال. ونعوض: $m_E = m_C$ فنحصل على تسارع $a = 0$ كما هو متوقع. وكذلك إذا كانت إحدى الكتلتين تساوي صفرا (ولنضع $m_C = 0$)، فإن الكتلة الأخرى ($m_E \neq 0$) ستتسارع بمقدار يمكن التنبؤ به من المعادلة؛ أي بمعدل $a = g$ كما هو متوقع أيضاً.

تطبيق الفيزياء
المصعد (كآلة آتوود)





الشكل 4 -23 (المثال 4 - 13) (أ) آلة آتوود ممثلة بنظام المصعد والوزن المضاد. (ب) و (جـ) مخططات جسم-حر للجسمين.

حل المسألة

تأكد من نتائجك باختبارها في حالات يمكن التنبؤ بحلولها وإجاباتها بسهولة.

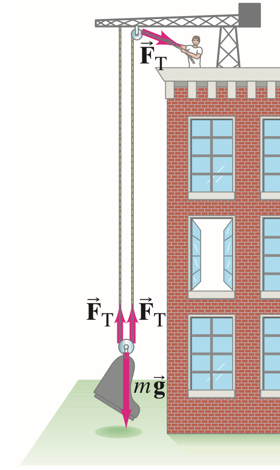
المثال المفاهيمي 4-14

فوائد البكرة. يحاول عامل نقل رفع آلة البيانو (بهدوء) إلى شقة في الطابق الثاني (الشكل 4 – 24). ويستخدم لإنجاز هذا حبلاً يلف حول بكرتين كما هو موضح. ما القوى التي يجب أن يؤثر فيها على الحبل ليرفع بيانو وزنه 2000 N بهدوء؟

الإجابة: يمكن اعتبار قيمة قوة الشد F_T خلال الحبل متساوية عند أي نقطة على امتداد الحبل في حالة إهمال كتلة الحبل. ولاحظ أولاً القوى المؤثرة في البكرة السفلية بالقرب من البيانو؛ حيث يسحب وزن البيانو البكرة إلى الأسفل خلال الحبل القصير. أما الشد في الحبل الملتف حول البكرة فيسحب إلى الأعلى مرتين: مرة خلال كل جانب من جانبي البكرة. ونطبق قانون نيوتن الثاني على ثنائي البيانو – البكرة (وكتلته m):

$$2F_T - mg = ma$$

ولرفع البيانو بسرعة ثابتة (نضع $a = 0$ في هذه المعادلة) وعليه، نحتاج إلى شد في الحبل. ويكون السحب المؤثر في الحبل $F_T = mg/2$. ويستطيع عامل النقل أن يؤثر بقوة تعادل نصف وزن البيانو. ونقول إن البكرة وفرت فائدة **ميكانيكية مضاعفة**؛ لأن عدم وجود البكرة يرغم عامل النقل على أن يؤثر بضعف القوة السابقة.



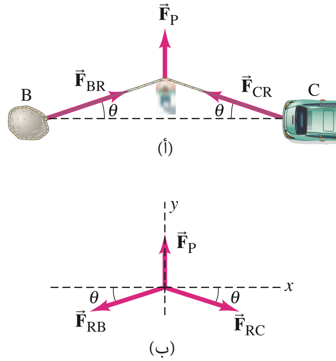
الشكل 4 - 24 (المثال 4 - 14)

المثال 4-15 إخراج السيارة من الوحل.

كيف تخرج من الوحل

لإخراج سيارتها العالقة في الوحل؛ ربطت طالبة دراسات عليا في الفيزياء مصد سيارتها بحبل متين. وربطت الطرف الآخر للحبل بجلمود صخر، كما هو مبين في (الشكل 4 – 25أ). ومن ثم سحبت الحبل من منتصفه بأقصى قوة ممكنة: $F_P \approx 300\ \text{N}$ تقديرًا. ولتبدأ السيارة بالتحرك من موضعها عندما أصبحت الزاوية التي يصنعها الحبل θ حسب تقديرها خمس درجات (انظر الشكل). ما القوة التي يؤثر بها الحبل في السيارة؟ اهمل كتلة الحبل.

النهج: لاحظ أولاً أنّ الشدّ في الحبل هو دائمًا على امتداد الحبل. حيث إنّ أيّ مركبة عمودية على الحبل ستعمل على ثني الحبل (كما هو موضّح هنا كنتيجة لتأثير $\vec{F}_P$). وبكلمات أخرى: يستطيع الحبل أن يدعم قوة شد على امتداد طوله فقط. لِجعل $\vec{F}_{BR}$ و $\vec{F}_{CR}$ القوتين المؤثرتين في الجلمود والسيارة نتيجة الشد في الحبل، كما هو موضّح في (الشكل 4 – 25أ). ودعنا نختار أن ننظر إلى القوى المؤثرة في جزء صغير جداً من الحبل عند الدفع. يظهر مخطط الجسم- الحر في (الشكل 4 – 25ب) القوة $\vec{F}_P$ كما يوضح الشد في الحبل (لاحظ بأننا استخدمنا قانون نيوتن الثالث): $\vec{F}_{RC} = -\vec{F}_{CR}$ ، $\vec{F}_{RB} = -\vec{F}_{BR}$. ولا يزال التسارع سيعادل الصفر خصوصاً عندما تبدأ السيارة بالتحرك.



الشكل 4 - 25 (المثال 4 - 15).
(أ) إخراج السيارة من الوحل مظهرًا القوى المؤثرة في الجلمود والسيارة بواسطة الشخص. (ب) مخطط الجسم الحر : القوى على جزءٍ صغير جدًا من الحبل.

الحل: وعند التعويض في المركبة السينية (x) للمعادلة $\Sigma\vec{F} = m\vec{a} = 0$ المطبقة على الجزء الصغير من الحبل (الشكل 4 – 25 ب) نحصل على:

$$\Sigma F_x = F_{RB}\cos\theta - F_{RC}\cos\theta = 0$$

وعليه، فإن $F_{RB} = F_{RC}$. وتمثل هذه القوى مقدار الشد في الحبل، وسنرمز إليها بـ F_T. وعليه، نستطيع أن نكتب $F_T = F_{RB} = F_{RC}$. أمّا في الاتجاه الصادي (y)، فإنّ القوى المؤثّرة هي F_P ومركبات كل من F_{RB} و F_{RC} التي تشير إلى الاتجاه الصادي السالب ($-y$) (وكلّ منها يعادل $F_T \sin\theta$). وعليه، فإنّ المركبة الصادية (y) للمعادلة: $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ هي:

$$\Sigma F_y = F_P - 2F_T\sin\theta = 0$$

ونحل المعادلة من أجل F_T بعد أن نعوض $\theta = 5°$ و $F_P \approx 300\ \text{N}$ لإيجاد F_T:

$$F_T = \frac{F_P}{2\sin\theta} \approx \frac{300\ \text{N}}{2\sin 5°} \approx 1700\ \text{N}$$

وعندما أثرت خريجة الفيزياء النبيهة بقوة 300 N في الحبل، نتجت قوة لتؤثر في السيارة بمقدار 1700 N؛ أي أنها كانت قادرة على مضاعفة جهدها بهذه الطريقة بما يقارب ستة أضعاف.

ملحوظة: لاحظ التماثل في هذه المسألة، الذي يضمن لنا أن: $F_{RB} - F_{RC}$.

ملحوظة: قارن بين (الشكلين 4 – 25أ وب). ولاحظ أننا لا نستطيع تطبيق قانون نيوتن الثاني باستخدام (الشكل 4 – 25أ)؛ لأن متجهات القوى لا تؤثر في الجسم نفسه. ولكننا عندما نختار جزءًا صغيرًا جدًا من الحبل، ونعتبره الجسم المعني، ونطبق قانون نيوتن الثالث (وفي هذه الحالة نعتبر أن الجلمود والسيارة هما اللذان سيؤثران في الحبل بقوتين F_{RB} و F_{RC}) فسنرى عندها أن القوى جميعها تؤثر في الجسم نفسه.

حل المسألة

استخدم أي تماثل قائم لتسهيل المسألة.

8-4 مسائل تتضمن الاحتكاك والمنحدرات

الاحتكاك

لقد أهملنا الاحتكاك حتى هذه اللحظة. علمًا بأن أخذه بنظر الاعتبار ضروري في معظم الحالات العملية. وهناك احتكاك بين أي سطحين صلبين؛ لأنه وبالرغم من ظهور السطوح على أنها ملساء تمامًا. فالحقيقة أنها خشنة. خصوصًا إذا ما نظر إليها على المقياس المجهري (الشكل 4 − 26). وعندما نحاول زلق جسم ما على سطح آخر. فإن النتوءات المجهرية ستمانع الحركة. هذا ولم يتم التوصل حتى الآن إلى فهم حقيقي كامل حول ما يحدث على المستوى المجهري. ويعتقد أن ذرات نتوء أحد السطحين تقترب كثيرًا من ذرات السطح الآخر لدرجة تجعلها قادرة على "الترابط" تحت تأثير قوى التجاذب الكهربائية ليصبح السطحان وكأنهما قد التحما مع بعضهما بعضًا. ويعدّ انزلاق جسم ما على أي سطح عادة عملاً غير مستقرٍّ بسبب الاعتقاد بتكوّن بعض الروابط وتكسرها. وعندما يتدحرج جسم كروي على سطح ما. فإنّ الاحتكاك لن يختفي تمامًا. بل تبقى له قيمة وإن كانت صغيرة جدًّا في هذه الحالة. ويطلق على هذا الاحتكاك الكروي "احتكاك التدحرج". وهو أقل بكثير مقارنة بالاحتكاك الناتج من حركة الجسم المنزلق على السطح.

وسنركز الآن على الاحتكاك الناتج من الانزلاق. الذي يسمى **الاحتكاك الحركي** (وجاءت كلمة حركي من اليونانية).

وعندما ينزلق جسم على امتداد سطح خشن. فإن قوة الاحتكاك الحركي تؤثر بعكس اتجاه سرعة الجسم. وتعتمد قيمة قوة الاحتكاك الحركي على طبيعة السطحين المنزلقين. وقد لوحظ عملياً أن قوة الاحتكاك تتناسب طرديًّا مع القوّة العموديّة بين السطحين"تقريبًا" . وهي عموديّة على سطح تلاقيهما المشترك (انظر الشكل 4 − 27). وفي حالاتٍ كثيرة. لا تعتمد قوة الاحتكاك بين السطوح الصلبة على مساحة سطح التلاقي الكلية؛ أي أن قوة الاحتكاك على الكتاب ستكون هي نفسها تقريبًا. سواء انزلق الكتاب على سطحه الكامل أو على جانبه. طالما أن الكتاب من كلّ جوانبه على الدرجة نفسها من النعومة. ونأخذ نموذجًا سهلًا للاحتكاك مفاده أن قوة الاحتكاك لا تعتمد على المساحة. لنكتب بعد ذلك التناسب بين قوة الاحتكاك F_{fr} والقوة العمودية F_N على شكل معادلة بعد إدخال ثابت التناسب μ_k:

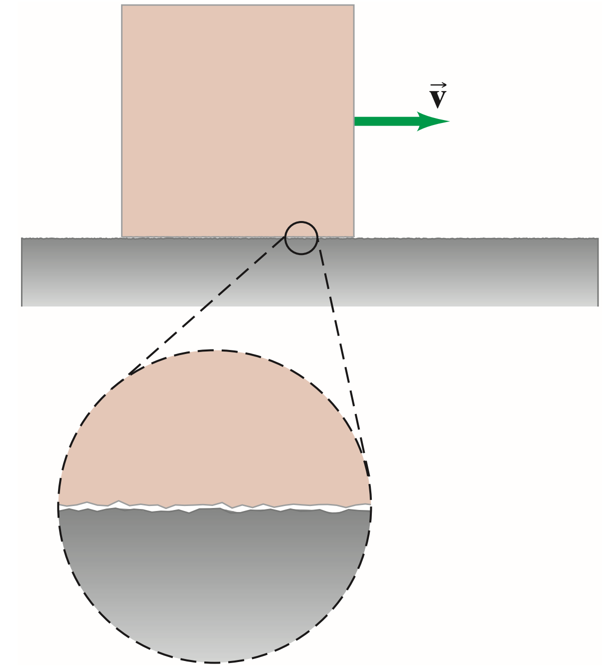
$$F_{fr} = \mu_k F_N$$

ولا تُعدّ هذه العلاقة قانوناً جوهرياً. بل علاقة تجريبية بين قيمة قوة الاحتكاك F_{fr} التي تؤثر باتجاه موازٍ للسطحين. وقيمة القوة العمودية F_N التي تؤثر باتجاه عمودي على السطحين. وهي لا تُعدّ معادلة متجهة بسبب تعامد القوتين على بعضهما بعضًا. ويدعى الحد μ_k بمعامل الاحتكاك الحركي الذي تعتمد قيمته على طبيعة السطحين. ويعرض (الجدول 4 − 2) قيماً مقيسة لسطوح مختلفة. وهي بالطبع قيم تقريبية لاعتماد μ على مدى جفاف السطوح أو رطوبتها. ودرجة تدليكها أو حفها. ودرجة خشونتها وعلى عدة عوامل أخرى. ومع هذا. فإن μ_k لا تعتمد على سرعة الانزلاق أو مساحة التلاقي.

الجدول 4 - 2 معاملات الاحتكاك*

السطوح	معامل الاحتكاك السكوني μ_s	معامل الاحتكاك الحركية μ_k
خشب فوق خشب	0.4	0.2
ثلج فوق ثلج	0.1	0.03
فلز فوق فلز (مزيت)	0.15	0.07
فولاذ فوق فولاذ (غير مزيت)	0.7	0.6
مطاط فوق خرسانة جافة	1.0	0.8
مطاط فوق خرسانة رطبة	0.7	0.5
مطاط فوق سطوح أخرى صلبة	1–4	1
تفلون فوق تفلون في الهواء	0.04	0.04
تفلون فوق خرسانة في الهواء	0.04	0.04
كرات تحميلية مزيتة	<0.01	<0.01
سائل أغشية المفاصل(في الأطراف البشرية)	0.01	0.01

* القيم التقريبية. وتستخدم كدليل فقط.

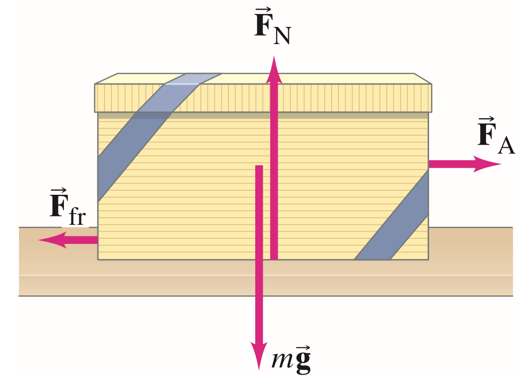


الشكل 4 - 26 جسم يتحرك إلى اليمين فوق طاولة أو فوق أرض. المتلاقيان خشنان في المقياس المجهري على أقل تقدير.

الاحتكاك الحركي

$\vec{F}_{fr} \perp \vec{F}_N$

الشكل 4 - 27 عندما يسحب جسم ما بواسطة قوة مؤثرة ($\vec{F}_A$) في سطح ما، فإن قوة الاحتكاك $\vec{F}_{fr}$ ستعاكس الحركة. وتتناسب قيمة $\vec{F}_{fr}$ طرديًا مع قيمة القوة العمودية (F_N)



وما تمت مناقشته إلى الآن هو الاحتكاك الحركي الناتج من انزلاق سطح فوق آخر. وهناك أيضاً **الاحتكاك السكوني** الذي يشير إلى قوة موازية لسطحين قد تنشأ بالرغم من عدم انزلاق أي منهما على الآخر. ولنفترض أن هناك جسماً ما كالمكتب يركد ساكناً فوق أرض أفقية. وإذا لم يتم التأثير في المكتب بأي قوة أفقية، فلن يكون هناك أي احتكاك. ولكن عندما تدفع المكتب ويبقى ساكناً في موضعه، فلا بد لك أن تستنتج عندها من وجود قوة أخرى تؤثر في المكتب في الاتجاه المعاكس لتبقيه في موضعه بلا حراك (فتكون القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرا). وهذه القوة ما هي إلا قوة الاحتكاك السكوني التي يُؤثر بها سطح الأرض في المكتب. وعندما تدفع المكتب بقوة أكبر من غير أن يتحرك من موضعه، فهو دلالة على ازدياد قيمة قوة الاحتكاك السكوني. وإذا دفعته بقوة كافية فسيبدأ المكتب بالحركة من موضعه ليبدأ عندها تأثير قوة الاحتكاك الحركي. وتكون عند تلك النقطة قد تجاوزت القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني التي تعطى كالتالي: $F_{fr}(\max) = \mu_s F_N$ حيث تمثل μ_s معامل الاحتكاك السكوني (الجدول $4-2$). وبما أنه قيمة قوة الاحتكاك السكوني تتغير من الصفر وحتى هذه القيمة العظمى، فتكتب:

احتكاك سكوني

$$F_{fr} \leq \mu_s F_N$$

وغالباً ما تلاحظ أنه من الأسهل أن تبقي جسماً ثقيلاً يستمر في الانزلاق من أن ترغمه على أن يبدأ عملية الانزلاق. وهذا يتلاءم مع كون μ_s أكبر على نحو عام من μ_k (انظر الجدول $4-2$).

مثال 4-16 الاحتكاكان السكوني والحركي

يركد صندوق الهدايا (كتلته 10.0-kg) على سطح أرضية على نحو أفقي. افترض أن معامل الاحتكاك السكوني $\mu_k = 0.30$. حدد قوة الاحتكاك F_{fr} المؤثرة في الصندوق إذا كانت قيمة القوة الأفقية الخارجية المؤثرة فيه هي: (أ) 0. (ب) 10 N. (جـ) 20 N. (د) 38 N. (هـ) 40 N.

النهج: لا يمكن الجزم مباشرة فيما إذا كنا نتعامل مع قوة احتكاك سكوني أم مع قوة احتكاك حركي، أو أن الجسم سيبقى ثابتاً، أم أنه سيتسارع.

وعليه، فنحن بحاجة إلى رسم مخطط جسم حر، ونحدد في كل حالة ما إذا كان الجسم سيبدأ بالحركة أم لا باستخدام قانون نيوتن الثاني. وأمّا القوى التي تؤثر في الجسم فهي الجاذبية $m\vec{g}$، والقوة العمودية التي تؤثر فيها الأرضية $\vec{F}_N$، والقوة الأفقية المؤثرة $\vec{F}_A$، وقوة الاحتكاك $\vec{F}_{fr}$ كما هو موضح في (الشكل $4-27$).

الحل: يظهر في (الشكل $4-27$) مخطط الجسم الحر. ولا توجد حركة في الاتجاه الرأسي؛ حيث يعطي قانون نيوتن الثاني في هذا الاتجاه: $\Sigma F_y = ma_y = 0$ ويخبرنا بأنّ: $F_N - mg = 0$.

وعليه، فإن القوة العمودية هي:

$$F_N = mg = (10.0\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 98\,\text{N}$$

(أ) وبما أنه لا توجد أي قوة خارجية F_A مؤثرة في هذه الحالة الأولى، فإن الصندوق لن يتحرك من موضعه، وتكون $F_{fr} = 0$.

(ب) إن قوة الاحتكاك السكوني ستمانع أي قوة مؤثرة، وحتى قيمة عظمى تعطى حسب العلاقة التالية:

$$\mu_s F_N = (0.40)(98\,\text{N}) = 39\,\text{N}$$

وعندما تكون قيمة القوة المؤثرة هي $F_A = 10\,\text{N}$، فإن الصندوق لن يتحرك من موضعه. حيث: $\Sigma F_x = F_A - F_{fr} = 0$، وعليه $F_{fr} = 10\,\text{N}$.

(جـ) إن قوة مؤثرة قيمتها 20 N هي قوة غير كافية لتحريك الصندوق. وعليه، فستكون القوة التي ستوازن القوة المؤثرة $F_{fr} = 20\,\text{N}$.

(د) إن القوة المؤثرة $F_A = 38\,\text{N}$ لا تزال غير كافية لتبدأ بتحريك الصندوق. وعليه فإن قوة الاحتكاك تكون قد ازدادت إلى 38 N، ويبقى الصندوق ساكناً في موضعه.

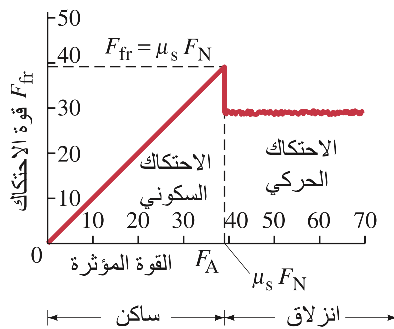
(هـ) أما قوة بمقدار 40 N، فهي كافية لبدء الحركة؛ لأنها أكبر من القيمة العظمى للاحتكاك السكوني، $\mu_s F_N = (0.40)(98\,\text{N}) = 39\,\text{N}$ وسنناقش الآن الاحتكاك الحركي الذي تعطى قيمته كالتالي:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.30)(98\,\text{N}) = 29\,\text{N}$$

ونتكلم الآن عن محصلة (أفقية) للقوى تؤثر في الصندوق، وقيمتها $F = 40\,\text{N} - 29\,\text{N} = 11\,\text{N}$ ليبدأ الصندوق بالتسارع بمعدل:

$$a_x = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{11\,\text{N}}{10\,\text{kg}} = 1.1\,\text{m/s}^2$$

وتستمر هذه الحالة وهذا التسارع طالما بقيت القوة المؤثرة 40 N. ويظهر (الشكل $4-28$) منحنى

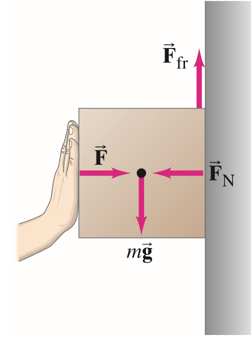


الشكل 4 - 28 (المثال 4 - 16). قيمة قوة الاحتكاك كدالة في القوة الخارجية المؤثرة في جسم ساكن بداية. وتزداد قيمة الاحتكاك السكوني خطيا لتتعادل مع الازدياد في قيمة القوة المؤثرة، إلى أن تعادل قيمة القوة المؤثرة $\mu_s F_N$. فإذا ازدادت قيمة القوة المؤثرة على هذا المقدار، فإن الجسم يبدأ بالتحرك من موضعه، لتنخفض عندها قيمة قوة الاحتكاك إلى قيمة ثابتة تقريبًا ومميزة للاحتكاك الحركي.

المثال المفاهيمي 4-17 صندوق ملامس لحائط:

تستطيع أن تدفع صندوقاً أفقيًّا وبشدّةٍ ليلامس حائطًا خشنًا (الشكل 4 − 29) وتمنعه من الانزلاق إلى الأسفل. كيف ينعكس تطبيق القوة أفقياً على منع جسم ما من التحرك رأسياً؟

الإجابة: لن يكون هذا ممكناً لو كان الحائط زلقاً؛ فنحن بحاجة إلى الاحتكاك. ومع هذا سيبدأ الصندوق بالانزلاق ما لم تكن قوة الدفع كافية؛ حيث إن القوة الأفقية المؤثرة تولد قوة عمودية ليؤثر بها الحائط في الصندوق. وعندها ستتعادل قوة الجاذبية mg والمؤثرة إلى الأسفل مع قوة الاحتكاك المؤثرة إلى الأعلى. والتي تتناسب قيمتها مع القوة العمودية. وكلما زاد الدفع زادت قيمة F_N لتزيد معها F_{fr}. وإذا لم تدفع بقوة كافية، فإن $mg > \mu_s F_N$ وسيبدأ عندها الصندوق بالانزلاق إلى الأسفل.



الشكل 4 - 29 (المثال 4 - 17).

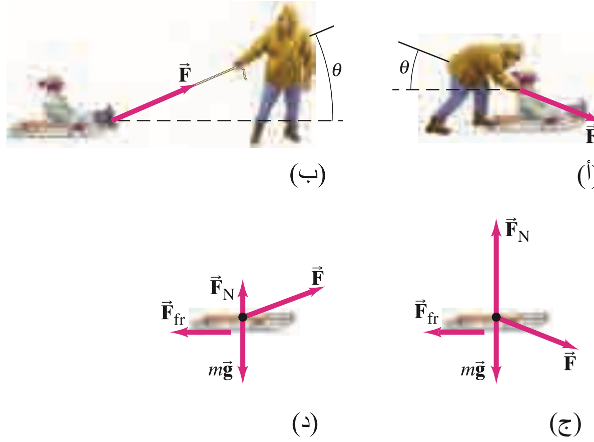
أمثلة إضافية

سنقدم الآن أمثلة أخرى محلولة لمساعدتك على حل المسائل.

المثال المفاهيمي 4-18 دفع الزلاجة أم سحبها؟

إذا أرادت أختك الصغيرة ركوب زلاجة، فما الخيار الأفضل والأسهل لك وأنت تقف على الأرض: دفع الزلاجة أم سحبها؟ انظر (الشكلين 4 − 30 أ وب). افترض الزاوية θ نفسها في الحالتين.

الإجابة: دعنا نرسم مخطط جسم - حر للثنائي الزلاجة − الأخت، كما هو موضح في (الشكلين 4 − 30 جـ و د). يُظهر المخططان القوة التي تؤثر أنت بها $\vec{F}$ (المجهولة)، والقوة العمودية $\vec{F}_N$، وقوة الثلج، وقوة الاحتكاك $\vec{F}_{fr}$، وقوة الجاذبية $m\vec{g}$. (أ) إذا دفعتها وكانت $\theta > 0$ فستكون هناك مركبة رأسية لقوتك إلى الأسفل. وعليه، فإن القوة العمودية التي تؤثر بها الأرض إلى الأعلى (الشكل 4 − 30 جـ) ستكون أكبر من mg (حيث تمثل m كتلة الأخت بالإضافة إلى كتلة الزلاجة). (ب) أما إذا سحبتها، فسيكون هناك مركبة رأسية لقوة سحبك إلى الأعلى. وعليه، فإن القوة العمودية F_N ستصبح أقل من mg (الشكل 4 − 30 د). وبما أن قوة الاحتكاك تتناسب طردياً مع القوة العمودية، فإن F_{fr} ستكون أقل في حالة السحب. وعليه، فإنك ستحتاج إلى التأثير بقوة أقل في حالة سحبها.



الشكل 4 - 30 (المثال 4 - 18).

المثال 4-19 السحب بوجود الاحتكاك

سُحب صندوق كتلته 10.0-kg على امتداد سطح أفقي بواسطة قوة F_P مقدارها 40.0 N أثرت بزاوية 30.0°. وهذا مماثل تماما (للمثال 4 − 11) مع فارق وجود احتكاك. ونفترض أن معامل الاحتكاك الحركي 0.30. احسب التسارع.

النهج: يشبه مخطط الجسم − الحر ما تم عرضه في (الشكل 4 − 21) مع وجود قوة إضافية واحدة وهي الاحتكاك. انظر (الشكل 4 − 31).

الحل: الحسابات في اتجاه (y) الرأسي كما ورد في (المثال 4 − 11) حيث رأينا أن: $F_{Py} = 20.0\,N,\ F_{Px} = 34.6\,N$ والقوة العمودية $F_N = 78.0\,N$.

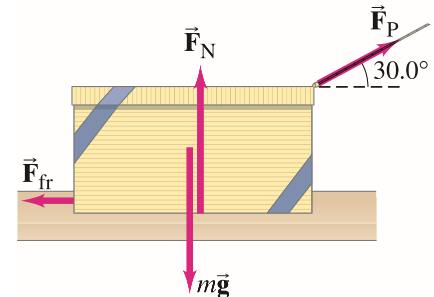
ونطبق الآن قانون نيوتن الثاني في اتجاه (x) الأفقي (الموجب لليمين) مضيفين قوة الاحتكاك:

$$F_{Px} - F_{fr} = ma_x$$

ويكون الاحتكاك حركياً ما دام $F_{fr} = \mu_k F_N$ أقل من $F_{Px}\,(=34.6\,N)$ ويعطى كالتالي:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.30)(78.0\,N) = 23.4\,N$$

الشكل 4 - 31 (المثال 4 - 19)



وعليه، فإن تسارع الصندوق:

$$a_x = \frac{F_{Px} - F_{fr}}{m} = \frac{34.6\ \text{N} - 23.4\ \text{N}}{10.0\ \text{kg}} = 1.1\ \text{m/s}^2$$

وفي غياب الاحتكاك، كما رأينا في (المثال 4 – 11)، فسيكون التسارع أكبر بكثيرٍ من هذا المعدل.

ملحوظة : تحتوي إجابتنا النهائية على رقمين مميزين فقط؛ لأن ($\mu_k = 0.30$) يحتوي على رقمين فقط.

التمرين (ب) : ماذا تستنتج عندما تكون $\mu_k F_N$ أكبر من F_{Px}؟

المثال 4-20 صندوقان وبكرة

يرتبط صندوقان في (الشكل 4 – 32 أ) بواسطة حبل يمر فوق بكرة. افترض أن معامل الاحتكاك الحركي بين الصندوق A والطاولة يساوي 0.20. وعند إهمال كتلة الحبل والبكرة وأي احتكاك ناتج من البكرة، ستستطيع الافتراض بأنّ قيمة القوة المؤثرة عند أحد طرفي الحبل تساوي قيمة القوة المؤثرة عند طرفه الآخر. والآن، ما تسارع النظام a، علماً بأن قيمة تسارع الصندوق A ستعادل قيمة تسارع الصندوق B على افتراض أن الحبل لن يتمدد؟ لاحظ أنه عندما يتحرك الصندوق B إلى الأسفل، فإن الصندوق A سيتحرك إلى اليمين.

النهج: سنحتاج إلى مخطط جسم حر لكل صندوق، كما في (الشكلين 4 – 32 ب و جـ) لكي نستطيع تطبيق قانون نيوتن الثاني لكل من الجسمين على حدة. إن القوى المؤثرة في الصندوق A هي قوة السحب في الحبل F_T، وقوة الجاذبية $m_A g$، والقوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة F_N، وقوة الاحتكاك التي تؤثر بها الطاولة F_{fr}، وأما القوى على الصندوق B فهي قوة الجاذبية $m_B g$، وقوة السحب إلى الأعلى في الحبل F_T.

الحل : بما أن الصندوق A لن يتحرك رأسياً، فإن تطبيق قانون نيوتن الثاني يعطي القوة العمودية بدلالة الوزن:

$$F_N = m_A g = (5.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 49\ \text{N}$$

وهناك قوتان على الصندوق A في الاتجاه الأفقي (الشكل 4 – 32 ب) : F_T الشد في الحبل (ولا نعرف قيمته) وقوة الاحتكاك:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.20)(49\ \text{N}) = 9.8\ \text{N}$$

وبما أننا نرغب في إيجاد التسارع الأفقي، فسنطبق قانون نيوتن الثاني في اتجاه (x) الأفقي $\Sigma F_{Ax} = m_A a_x$ الذي سيصبح (عند أخذ الاتجاه الموجب إلى اليمين وبوضع $a_{Ax} = a$):

$$[\text{الصندوق A}] \quad \Sigma F_{Ax} = F_T - F_{fr} = m_A a$$

والآن، لنأخذ الصندوق B بالحسبان: تسحب قوة الجاذبية $m_B g = (2.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 19.6\ \text{N}$ إلى الأسفل ويسحب الحبل إلى الأعلى بقوة F_T. ونستطيع أن نكتب قانون نيوتن الثاني للصندوق B (على افتراض الاتجاه الموجب إلى الأسفل):

$$[\text{الصندوق B}] \quad \Sigma F_{By} = m_B g - F_T = m_B a$$

[لاحظ أنه إذا كانت $a \neq 0$ فإن F_T لن تعادل $m_B g$]

وبحل معادلة الصندوق A لإيجاد F_T:

$$F_T = F_{fr} + m_A a$$

ونعوض هذا في معادلة الصندوق B :

$$m_B g - F_{fr} - m_A a = m_B a$$

ونحل الآن لإيجاد a مع التعويض بالقيم العددية :

$$a = \frac{m_B g - F_{fr}}{m_A + m_B} = \frac{19.6\ \text{N} - 9.8\ \text{N}}{5.0\ \text{kg} + 2.0\ \text{kg}} = 1.4\ \text{m/s}^2$$

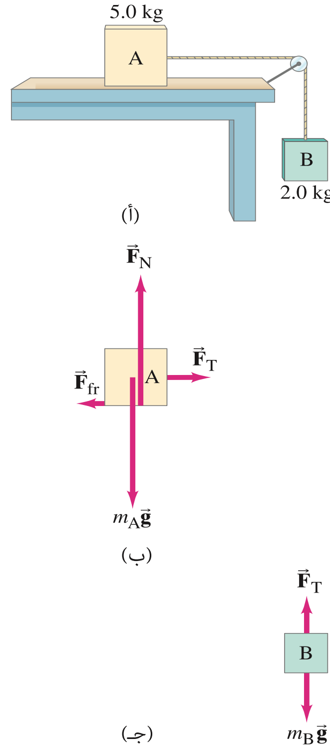
وهو تسارع الصندوق A إلى اليمين والصندوق B إلى الأسفل.

ونستطيع إذا أردنا أن نحسب F_T باستخدام المعادلة الأولى:

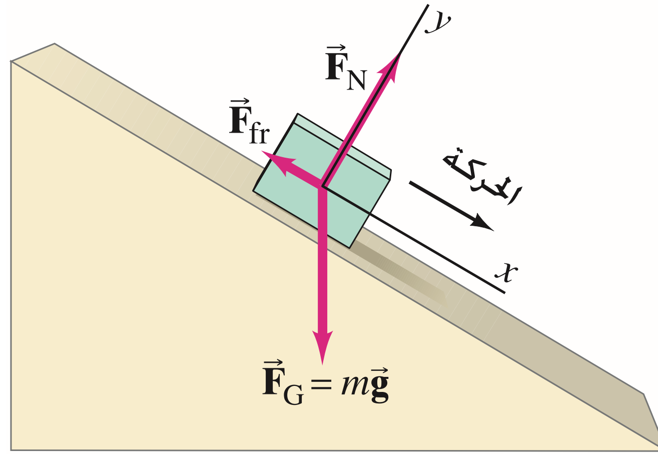
$$F_T = F_{fr} + m_A a = 9.8\ \text{N} + (5.0\ \text{kg})(1.4\ \text{m/s}^2) = 17\ \text{N}$$

ملحوظة: لا تُعدّ حركة الصندوق B إلى الأسفل سقوطًا حرًا. وهو لا يسقط بمعدل $a = g$ لتأثره بالقوة الإضافية F_T إلى الأعلى.

الشكل **4 - 32** (المثال 4 - 20).



تنويه:
قد لا يعادل الشد في الحبل المساند للجسم الساقط وزن الجسم.



الشكل 4 - 33 القوى على جسم ينزلق إلى أسفل سطح مائل

السطوح المائلة

سوف نأخذ الآن بالاعتبار ما يحدث عندما ينزلق جسم إلى أسفل سطح مائل ما. مثل تلة أو سطح مائل. تُعدّ هذه المسائل مثيرة للاهتمام لأنّ الجاذبية هي المسؤولة في هذه الحالات عن قوة التسارع. ومع هذا، فهي لا تشير إلى الاتجاه الرأسي. ويصبح حل المسائل أسهل عند اختيار نظام إحداثي xy بحيث يكون المحور (x) السيني على امتداد السطح المائل، والمحور (y) الصادي عمودي عليه، كما هو موضح في (الشكل $4-33$). ولاحظ أيضاً أن القوة العمودية ليست رأسية، ولكنها عمودية على السطح المائل للمستوى في (الشكل $4-33$).

حل المسألة

يزيد الاختيار الجيد للنظام الإحداثي من سهولة العمليات الحسابية

التمرين جـ : هل قوة الجاذبية عمودية على المستوى المائل دائما؟ وهل هي رأسية دائما؟

التمرين د: هل القوة عمودية على المستوى المائل دائما؟ وهل هي رأسية دائما؟

المثال 4-21 المتزلج

تطبيق الفيزياء

التزلج

بدأت المتزلجة بنزول السطح المائل المائل بزاوية $30°$ كما في (الشكل $4-34$). افترض أن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.10 واحسب: (أ) تسارعها. (ب) السرعة التي ستصل إليها بعد $4.0\ s$.

النهج: نختار المحور (x) السيني على امتداد الميل.

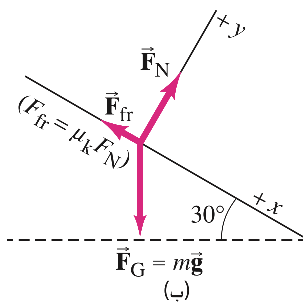
واتجاهه الموجب يشير إلى أسفل السطح المائل في الاتجاه نفسه لحركة المتزلجة.

ونختار المحور (y) الصادي عموديا على السطح، كما هو موضح.

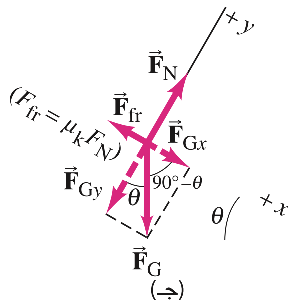
والقوى المؤثرة في المتزلجة هي الجاذبية $\vec{F}_G = m\vec{g}$ التي تشير رأسيًّا إلى الأسفل (لا عمودياً على الميل). والقوتان المؤثرتان في زلاجتيها بواسطة الثلج هما القوة العمودية للمنحدر الثلجي (غير الرأسية)، وقوة الاحتكاك الموازية للسطح. وتظهر هذه القوى الثلاث مؤثرة في نقطة واحدة في الشكل $4-34$ ب الذي يمثل مخطط الجسم – الحر للمتزلجة.



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل 4 - 34 (المثال 4 - 21). تهبط متزلجة منحدراً. وتمثل $\vec{F}_G = m\vec{g}$ قوة الجاذبية (الوزن على المتزلجة).

الحل: يكفي هنا أن نحلل متجهًا واحدًا فقط إلى مركباته. ويظهر الوزن $\vec{\mathbf{F}}_G$ ومركباته كخطوط متقطعة في (الشكل 4 − 34 جـ). ونستخدم θ هنا بدلاً من $30°$ من أجل التعميم. كما سنستخدم تعريف كل من جيب الزاوية ("الضلع المقابل") وجيب تمام الزاوية ("الضلع المجاور") للحصول على المركبات:

$$F_{Gx} = mg\sin\theta$$

$$F_{Gy} = -mg\cos\theta$$

حيث تشير F_{Gy} إلى اتجاه y السالب.

ولحساب تسارع المتزلج إلى أسفل التلة، a_x، نطبق قانون نيوتن الثاني باتجاه x:

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$mg\sin\theta - \mu_k F_N = ma_x$$

وتمثل القوتان المركبة السينية لقوة الجاذبية (اتجاه x الموجب) وقوة الاحتكاك (اتجاه x السالب) .

ولإيجاد قيمة a_x، يجب تحديد قيمة F_N المجهولة. وسنرى فيما إذا كنا نستطيع الحصول على F_N من المركبة الصادية (y) لقانون نيوتن الثاني:

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$F_N - mg\cos\theta = ma_y = 0$$

حيث وضعنا $a_y = 0$؛ لعدم وجود حركة في اتجاه y (العمودي على الميل). ونستطيع أن نحل لإيجاد F_N:

$$F_N = mg\cos\theta$$

ونستطيع أن نعوض هذا في معادلتنا في الأعلى من أجل ma_x:

$$mg\sin\theta - \mu_k(mg\cos\theta) = ma_x$$

ويمكن اختصار الكتلة m من الحدود جميعها للمعادلة السابقة. وبعد التعويض بقيمة $\theta = 30°$ و $\mu_k = 0.10$ يصبح:

$$a_x = g\sin 30° - \mu_k g\cos 30°$$

$$= 0.50g - (0.10)(0.866)g = 0.41g$$

وعليه، فإن تسارع المتزلج هو 0.41 ضعف تسارع الجاذبية الأرضية. وبدلالة الأرقام فإن $a = (0.41)(9.8\,m/s^2) = 4.0\,m/s^2$. ومن المثير أن يتم اختصار الكتلة لنصل إلى استنتاج مفيد مدلوله أن التسارع لا يعتمد على الكتلة. وتحدث هذه الاختصارات في بعض الأوقات لتعطي استنتاجات مفيدة في حينها، وعليه، فإن استخدام المعادلات الجبرية والتعويض بالأرقام يُعدّ عملًا إيجابيًّا كبيرًا.

(ب) وبما أنّ التسارع ثابت، فإن السرعة بعد 4.0 s يمكن إيجادها باستخدام (المعادلة 2 − 11 أ) كالتالي:

$$v = v_0 + at$$

$$= 0 + (4.0\,m/s^2)(4.0\,s) = 16\,m/s$$

حيث افترضنا بدء الحركة من السكون.

حل المسألة

غالبـــاً ما يكون مفيـــدا التعويض بالأرقام عند النهاية فقط.

ومن الأخطاء الشائعة أن يكون تحديد اتجاه القوة العمودية غير صحيح، وكذلك اتجاه الجاذبية الأرضية خصوصًا عندما يكون السطح مائلًا أو على السطوح المائلة. وأن القوة العمودية في (المثال 4 − 21) غير رأسية. وهي عمودية على الميل أو على السطح. وأما الجاذبية، فهي ليست عمودية على السطح المائل أو السطح المائل، ومع هذا، فهي تشير دائمًا في الاتجاه الرأسي إلى الأسفل باتجاه مركز الأرض.

تنويه:

اتجاه كل مـــن الجاذبية و القوة العمودية.

9-4 حل مسائل: طريقة حل عامة

يُعدّ حل المسائل بكفاءة جزءًا أساسيًّا من أي منهج مقرّر في الفيزياء. ويُعدّ النهج الذي تتم مناقشته هنا، الذي يوظف قوانين نيوتن، صالحًا وعلى نحو عام لتطبيقه على موضوعات كثيرة تم استعراضها والتطرق لها في هذا الكتاب.

طريقة حل المسائل بصورة عامة

1. اقرأ وأعد قراءة المسائل المكتوبة بتمعن. فمن الأخطاء الشائعة التجاوز عن كلمة أو كلمتين خلال القراءة مما يؤثر في مفهوم السؤال، ويغيّر فيه على نحو كبير.

2. ارسم صورةً دقيقةً أو مخططًا لكلّ حالة. (ربما تُعدّ هذه أهم خطوة في حلول المسائل، علما بأنها غالبا ما تهمل أو يتم التغاضي عنها). واستخدم أسهمًا لتمثل المتجهات، مثل السرعة المتجهة أو القوة، واعطِ رموزًا مناسبةً لهذه المتجهات. وعندما تتعامل مع القوى وتطبق قانون نيوتن الثاني، تأكد بأنه قد تمّ اعتبار القوى جميعها بما فيها المجهولة، وتأكد أيضا من عدم وجود أي التباس في تحديد الجسم الذي تؤثر فيه هذه القوة (وخلافًا لذلك، سينتج خطأ كبير في تحديد القوة المحصلة والمؤثرة في جسم ما). ويجب رسم **مخطط جسم – حر** منفصل لكل جسم في النظام المعني على حدة. يجب أن يضم هذا المخطط القوى المؤثرة في الجسم جميعها (وفقط على هذا الجسم). ولا تظهر أي قوة تؤثر في الأجسام الأخرى.

3. اختر نظام إحداثيات مناسب (xy) يسهل **العمليات الحسابية**، مثل جعل أحد المحاور منطبقًا على اتجاه التسارع. ويجب تحليل المتجهات إلى مركباتها على امتداد المحاور الأساسية للنظام الإحداثي. وعندما تستخدم قانون نيوتن الثاني، طبق المعادلة $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ باستخدام المركبات السينية والصادية كلًّا على حدة. وتذكر أن مركبات القوة في الاتجاه السيني ترتبط بـ a_x فقط وكذلك بالنسبة إلى الاتجاه الصادي. وإذا كان النظام يتكون من أكثر من جسم، فيمكنك اختيار أنظمة إحداثية مختلفة ومناسبة لكلّ جسمٍ على حدة.

4. اعمل قائمة تحتوي على المتغيرات جميعها سواء أكانت معلومة أم مجهولة (التي تحاول أن تجد قيمتها) وحدد ماذا تريد لإيجاد قيمة المتغير المجهول. وسنستخدم قانون نيوتن الثاني للمسائل في الفصل الحالي. وغالبا ما يساعد في الوصول إلى الحل على نحو عام إذا تم إيجاد **علاقات** أو **(معادلات)** تربط بين المعطيات والمجاهيل. وتأكد من صحة إمكانية تطبيق المعادلة في كل حالة. وهو من الضروري جدا أن تلم بقصور أيّ معادلة أو علاقة والحدود التي من ضمنها يمكن تطبيقها. ولقد تم إعطاء أرقام للمعادلات العامة في هذا الكتاب، ومع هذا فقد تكون معادلات خاضعة لشروط خاصة تحدُّ من صلاحيتها (وإذا كانت هذه هي الحقيقة، فقد تمت إضافة عبارة على الجانب داخل أقواس للإيحاء بذلك).

5. حاول أن تصل إلى إجابة تقريبية عن السؤال لترى إمكانية حل السؤال بصورة مقبولة (وللتأكد فيما إذا كانت المعلومات المعطاة كافية للحل). استخدم البداهة، واعمل حسابات أولية – انظر "تخمين قيمة أولية" في (البند 1 – 7). **تُعدّ الحسابات** الأولية والتقدير المنطقي لمدى الإجابة النهائية شيئًا مفيدًا جدًّا. وكذلك يمكن مقارنة الحسابات الأولية مع الإجابة النهائية لتحديد أخطاء الحسابات إن وجدت، مثل الخطأ في الخانة العشرية أو بالأس.

6. حل السؤال الذي قد يحتوي على معادلات جبرية و/أو حسابات رقمية. وتذكر المبدأ القائل بأنه يجب أن يكون عدد المعادلات معادلًا عدد المجاهيل على الأقل، أي أنه إذا كان هناك ثلاثة مجاهيل على سبيل المثال فإننا بحاجة إلى ثلاث معادلات مستقلة. ومن المفضل عادة أن تتعامل مع الرموز الجبرية قبل أن تبدأ التعويض بالأرقام. ما السبب وراء ذلك؟ هناك عدة أسباب منها : (أ) لأنك بذلك تكون قد توصلت إلى حل مناسب لعائلة من المسائل المتشابهة ذات الأرقام المختلفة. و(ب) تستطيع أن تختبر إجابتك ومقارنتها مع الحالات الخاصة، والتي بالإمكان تفسيرها وفهمها بيسر (ومثال على ذلك عند $\theta = 0°$ أو $90°$). (جـ) وقد تستطيع اختصار عدد من الحدود أو تصل إلى صورة مبسطة للحل النهائي. و(د) هناك احتمال أقل لحصول خطأ خلال الحسابات. و(هـ) من المحتمل أن تكتسب فهمًا أكبر للسؤال بهذه الطريقة.

7. ابذل جهدك لكي تحافظ على **الوحدات** فتتبعها عن يمين ويسار المعادلة يساعد على التأكد من موازنة المعادلة.

8. تأكد للمرة الأخيرة من أن الإجابة النهائية **منطقية**. واستخدام التحليل في الأبعاد المختلفة كما تم شرحه في (البند 1 - 8) حيث قد يساعد ذلك على فحص مسائل عديدة أخرى.

ملخص

تعدّ قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة القوانين التقليدية الأساسية التي تصف الحركة.

وينص قانون نيوتن الأول (قانون القصور الذاتي) على أنه إذا كانت محصلة القوى المؤثرة في جسم ما مساوية للصفر، فإن الجسم سيبقى على حالته من السكون أو الحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم.

وينص قانون نيوتن الثاني على أن تسارع جسم ما يتناسب طرديا مع محصلة القوى الخارجية المؤثرة فيه وعكسياً مع كتلته، ويمكن التعبير عنه رياضياً كالتالي:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a} \quad \textbf{(1 – 4)}$$

ويُعدّ قانون نيوتن الثاني أحد أهم قوانين الفيزياء التقليدية وأكثرها جوهرية.

وينص **قانون نيوتن الثالث** على أنه عندما يؤثر جسم ما بقوة في جسم آخر، فإن الجسم الآخر سيؤثر دائماً في الجسم الأول بقوة تعادلها بالمقدار وتعاكسها في الاتجاه :

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \qquad (2 - 4)$$

حيث $\vec{F}_{BA}$ هي القوة التي يؤثر بها الجسم A في الجسم B. ويسمى نزوح الجسم لممانعة التغير في حركته **بقصوره الذاتي**. وتُعدّ **الكتلة** مقياس القصور الذاتي لجسم ما.ويشير الوزن إلى مقدار قوة الجاذبية على الجسم المعني، ويعادل حاصل ضرب الكتلة في **تسارع الجاذبية الأرضية** $\vec{g}$:

$$\vec{F}_G = m\vec{g} \qquad (3 - 4)$$

ويمكن اعتبار متجه القوة هو الدفع أو السحب، أو حسب قانون نيوتن الثاني هو العمل القادر على توليد التسارع، أمّا محصّلة القوى فهي مجموع القوى الكلية المؤثّرة في الجسم.

ويمكن كتابة قوة الاحتكاك التي يؤثر بها كلّ جسم في الآخر عند انزلاق جسمين فوق بعضهما بعـضًا بالتقريب : $F_{fr} = \mu_k F_N$ حيث F_N القوة العمودية (القوة التي يؤثر بها كل جسم في الآخر والتي تكون عمودية على سطح تلاقي الجسمين) وأما μ_k فهو معامل الاحتكاك الحركي. ولكن إذا كانت الأجسام ساكنة بالنسبة إلى بعضها بعضًا، فإن قيمة F_{fr} ستكون كبيرة لدرجة كافية لإبقاء الأجسام ساكنة فتحقق غير المتساوية $F_{fr} < \mu_s F_N$ و يمثل μ_s معامل **الاحتكاك السكوني**.

ولحل المسائل المتضمنة قوى مؤثرة في جسم ما أو أكثر، فيُعدّ من الضروري **رسم مخطط جسم حر** لكل جسم على حدة موضحًا القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها. ويمكن تطبيق قانون نيوتن الثاني على المركبات المتجهة لكلّ جسمٍ على حدة.

أسئلـــة

1. لماذا يبدو الطفل في عربته وكأنه يقع إلى الخلف عندما تدفع العربة بقوة إلى الأمام؟

2. يقبع صندوق ساكناً على سطح أملس في مؤخرة شاحنة. وعندما يبدأ السائق بتحريك شاحنته من السكون لتتسارع إلى الأمام، يبدأ الصندوق بالانزلاق إلى الخلف. ناقش حركة الصندوق بدلالة معادلات نيوتن إذا تمت رؤيته من قبل (أ) فاطمة الواقفة على الأرض بجوار الشاحنة. (ب) أمين الذي يقف على ظهر الشاحنة (الشكل 4-35).



الشكل 4 - 35 السؤال 2.

3. إذا كان تسارع جسم ما يساوي الصفر، فهل لا تؤثر فيه أية قوة؟ وضح إجابتك.

4. هل يمكن لجسم ما أن يمتلك تسارعًا يساوي الصفر إذا كان متأثراً بقوة واحدة فقط؟ هل يمكن للجسم أن يمتلك سرعة مساوية للصفر؟ وضح إجابتك.

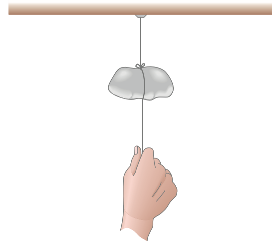
5. تسقط كرة جولف باتجاه الأرض لترتد مرتفعة عنها. (أ) هل تحتاج الكرة إلى قوة ما كي ترتد عن السطح؟ و(ب) إذا كان الحل نعم، فما الذي يؤثر بهذه القوة؟

6. إذا سار شخص إلى الخلف على طواف يطفو على سطح الماء، فلماذا يتحرك الطواف في الاتجاه المعاكس على سطح الماء؟

7. لماذا تشعر بالألم عندما تركل بقدمك مكتبًا أو حائطًا بشدة؟

8. عندما تقرر أن تقف فجأة وأنت تركض مسرعًا فيجب أن تتباطأ بسرعة. (أ) ما مصدر القوة التي ستتسبب في وقوفك؟ و(ب) قدر (مستخدماً خبرتك الخاصة) أعلى معدل تباطؤ ضروري للوقوف التام لشخص يركض مسرعًا.

9. يعلق حجر بواسطة خيط رفيع مثبت من أحد طرفيه في السقف، بينما يتدلى طرفه الآخر إلى الأسفل (الشكل 4 - 36).وإذا سحب شخص ما طرف الحبل المتدلي بشدة إلى الأسفل، فمن أي نقطة سينقطع الحبل : عند أسفل الحجر أم أعلاه؟ وماذا سيحدث لو أن الشخص سحب الحبل بلين وبحركة مستمرة؟ وضح إجاباتك؟



الشكل 4 - 36 السؤال 9.

10. تعادل قوة الجاذبية على صخرة كتلتها 2-kg ضعفي قوة الجاذبية على صخرة كتلتها 1-kg. لماذا إذن لا تسقط الصخرة الأثقل بسرعة أكبر؟

11. هل سيعطي الميزان الزمبركي عند وضعه على القمر قراءة أدق في حالة معايرته بدلالة (أ) الباوند. أم (ب) الكيلوجرام؟

12. يسـحب شـخص ما صندوقًا بقوة ثابتة بواسطة حبل أفقي على سـطح طاولة أملس. فإذا سـحب بعد ذلك الصندوق نفسـه على السـطح السـابق نفسـه بالقـوة الثابتة نفسـها ولكـن بزاوية ما مـع الأفقي (مع بقاء حركـة الصندوق أفقيـة على سـطح الطاولة)، فهل نسـتطيع أن نجزم بأن تسـارع الصندوق: (أ) سـيبقى ثابتاً. أو (ب) سـيزداد. أو (جـ) سـيقل؟ وضح إجابتك.

13. عندما يسقط جسم ما سقوطًا حرًا تحت تأثير الجاذبية يكون ذلك نتيجة لتأثره بمحصلة قوى مقدارها mg ناتجة من جذب الأرض. ومع هذا، وحسب قانون نيوتن الثالث، فإن هذا الجسم سيؤثر بقوة مماثلة ومعاكسة في الأرض. فلماذا لا يؤدي هذا إلى تحرك الكرة الأرضية؟

14. قارن بين المجهود (أو القوة) اللازمة لرفع جسم كتلته 10-kg عن سطح الأرض مع تلك اللازمة على سطح القمر. وقارن بين القوة اللازمة لقذف حجر كتلته 2-kg أفقيًّا وبسرعة معينة قرب سطح كل من القمر والأرض.

15. حسب قانون نيوتن الثالث، سيسحب كل فريق في مسابقة شد الحبل (الشكل 4 - 37) بقوة مماثلة لتلك الناتجة من الفريق الآخر. ما الذي سيحدد إذن الفريق الفائز؟



الشكل 4 - 37 السؤال 15. مسابقة شد الحبل. صف القوى على كل فريق وعلى الحبل.

16. يؤثر شخص ما بقوة إلى الأعلى مقدارها 40 N ليحمل كيسًا مليئًا بالمشتريات. صف قوة رد الفعل (حسب قانون نيوتن الثالث) بدلالة: (أ) القيمة. (ب) الاتجاه (جـ) على أي جسم تؤثر. (د) الجسم الذي يسببها.

17. ما مقدار القوة التي تؤثر بها الأرض في الشخص الذي يقف عليها بثبات؟ ولماذا لا تعمل هذه القوة على رفعك عاليا في الهواء؟

18. تنتج إصابة الرقبة أحياناً خلال حوادث المركبات عندما تضرب سيارة المصاب من الخلف بشدة وبعنف. فسر لماذا يظهر رأس المصاب وكأنه رُمي إلى الخلف في هذه الحالة. هل هذا ما يحدث فعلا؟

19. يتكئ صندوق ثقيل على سطح شاحنة مكشوفة. وعندما تتسارع الشاحنة، يبقى الصندوق في موضعه على الشاحنة، وعليه فهو سيتسارع أيضا. ما القوة التي تسبب تسارع الصندوق؟

20. تم دفع مكعب لينزلق على سطح مائل إلى الأعلى، وعندما وصل إلى أعلى نقطة ممكنة ترك لينزلق منحدرًا إلى الأسفل، ولكن تسارعه إلى الأسفل كان أقل من تسارعه إلى الأعلى. لماذا؟

21. هل ستختلف قراءة الميزان عندما تزن نفسك والميزان موضوع على سطح مائل؟ (افترض أن وظائف الميزان جميعها ستبقى سليمة حتى على السطح المائل).

مسائل

4 - 4 إلى 4 – 6 قوانين نيوتن وقوة الجاذبية الأرضية والقوة العمودية

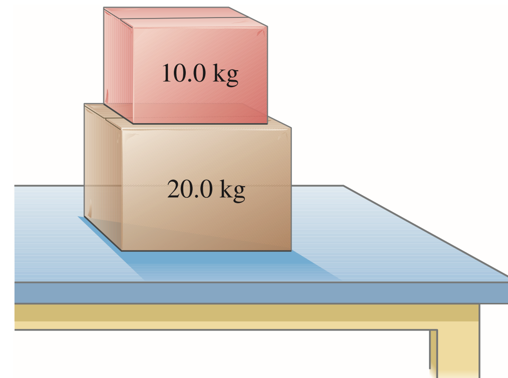
1. (I) ما القوة اللازمة لتسريع طفل على زلاجة (الكتلة الكلية = 60.0 kg) بمعدل $1.25\ m/s^2$؟

2. (I) تسرع محصلة قوة 265 N درّاجا مع دراجته بمعدل $2.30\ m/s^2$. فما كتلة الدرّاج ودراجته معاً؟

3. (I) ما مقدار الشد الواجب على الحبل تحمله عند تسريع سيارة كتلتها 960-kg أفقيًا على سطح أملس بمعدل $1.20\ m/s^2$؟

4. (I) ما وزن رائد فضاء كتلته 76-kg (أ) على سطح الأرض. (ب) على سطح القمر ($g = 1.7\ m/s^2$). (جـ) على سطح المريخ ($g = 3.7\ m/s^2$). (د) في الفضاء الخارجي عندما يسافر بسرعة ثابتة؟

5. (II) يجلس صندوق كتلته 20.0-kg ساكنًا على طاولة. (أ) ما وزن الصندوق وقيمة القوة العمودية المؤثرة فيه؟ (ب) عند وضع صندوق آخر كتلته 10.0-kg فوق الصندوق ذي الكتلة 20.0-kg كما هو موضح في (الشكل 4-38). حدد قيمة القوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق ذي الكتلة 20.0-kg، وكذلك القوة العمودية التي يؤثر بها صندوق العشرين في الصندوق الآخر ذي 10.0-kg.



الشكل 4- 38 المسألة 5.

6. (II) ما مقدار القوة الضرورية لإيقاف سيارة كتلتها 1100-kg خلال 8.0 s إذا كانت السيارة تتحرك بسرعة 95 km/h؟

7. (II) ما متوسط القوة الضرورية لتسريع رصاصة كتلتها 7.00 g من السكون وحتى 125 m/s خلال مسافة على امتداد ماسورة البندقية؟

8. (II) يخرج صياد سمكة من الماء بتسارع إلى الأعلى $2.5\ m/s^2$ بواسطة حبل صيد خفيف شدة انقطاعه تعادل 22 N. ولسوء حظ الصياد ينقطع الحبل وتهرب السمكة. ماذا تستطيع أن تستنتج بالنسبة إلى كتلة السمكة؟

9. (II) تصطدم كرة بيسبول كتلتها 0.140-kg تسير بسرعة 35.0 m/s بقفاز اللاعب الخصم فترتد يد اللاعب إلى الخلف مسافة 11.0 cm خلال عملية إيقاف الكرة. فما متوسط القوة التي أثرت بها الكرة في القفاز؟

10. (II) ما مقدار الشد اللازم على الحبل أن يتحمله عند استخدامه لتسريع سيارة كتلتها 1200-kg رأسيًا إلى الأعلى بمعدل $0.80\ m/s^2$؟

11. (II) تستطيع سيارة سباق معينة قطع مسافة ربع ميل (.4) خلال 6.40 s بدءًا من السكون. على افتراض أن التسارع ثابت، ما مقدار التسارع بدلالة مضاعفات "g's" التي سيخضع لها السائق؟ إذا كانت الكتلة الكلية للسائق وسيارته تعادل 485 kg فما القوة الأفقية التي سيؤثر بها الطريق في عجلات السيارة؟

12. (II) تم إنزال دلو كتلته 12.0-kg رأسيا إلى الأسفل بواسطة حبل يخضع لشد مقداره 163 N في لحظة ما، فما تسارع الدلو؟ هل التسارع إلى الأعلى أم إلى الأسفل؟

13. (II) تم تصميم مصعد (كتلته 4850 kg) بحيث يكون التسارع الأعظم 0.0680g. ما القوى العظمى والدنيا التي يجب أن يؤثر بها المحرك في الحبال الداعمة؟

14. (II) يحاول لص كتلته 75-kg الهروب من نافذة زنزانة في الطابق الثالث في السجن. ولسوء حظ اللص، فإن الحبل الذي صنعه من قماش غطاء السرير يتحمل فقط كتلة مقدارها 58 kg. كيف يمكن لهذا اللص استخدام "الحبل" في الهروب؟ أعط إجابة كمّيّة؟

15. (II) يقف شخص على الميزان في مصعد واقف. وعندما يبدأ المصعد بالتحرك، يقرأ الميزان فقط 0.75 من الوزن الحقيقي للشخص. احسب تسارع المصعد وحدد اتجاه التسارع.

16. (II) يتحمل حبل إسناد مصعد كتلته 2125-kg شدة عظمى مقدارها 21,750 N. ما أعظم تسارع يصله المصعد قبل أن ينقطع الحبل؟

17. (II) (أ) ما تسارع مظليان (كتلتهما مع مظلتيهما تعادل 132 kg) عندما تعادل قوة ممانعة الهواء إلى الأعلى ربع وزنهما؟ (ب). ما مقدار قوة ممانعة الهواء على المظليين ومظلتيهما عندما يهبطان بهدوء وبسرعة ثابتة باتجاه الأرض بعد فتح المظلتين ؟ انظر (الشكل 4 - 39).

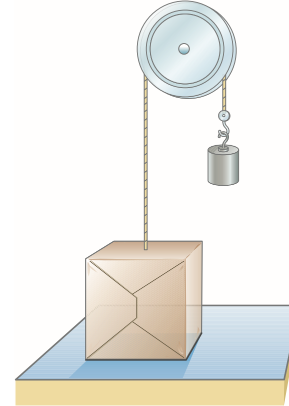


الشكل **4 - 39** المسألة 17.

18. (III) يقفز شخص من أعلى سقف منزل ارتفاعه 3.9-m. وعندما يصطدم بالأرض، يقوم بثني ركبتيه ليتباطأ جذعه خلال مسافة تقارب 0.70 m. إذا كانت كتلة جسمه (ما عدا رجليه) تعادل 42 kg، فأوجد: (أ) سرعته قبل أن تطأ قدماه الأرض. (ب) متوسط القوة المؤثرة في جذعه من قدميه خلال تباطؤه.

4 - 7 قوانين ومتجهات نيوتن.

19. (I) يركد صندوق وزنه 77.0 N ساكنًا على طاولة. يمتد الحبل المثبت بالصندوق إلى الأعلى ليمر خلال بكرة ويعلق بطرفه الآخر ثقل يتدلى من الجهة الأخرى إلى الأسفل. حدد القوة التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق إذا كان وزن الثقل المتدلّي من طرف الحبل الآخر: (أ) 30.0 N. (ب) 60.0 N. (جـ) 90.0 N.



الشكل **(4 - 40)** المسألة 19.

20. (I) ارسم مخطط الجسم الحر للاعب كرة سلة: (أ) قبل أن يقفز إلى الأعلى عن الأرض. (ب) وهو في الهواء. انظر (الشكل 4 - 41).

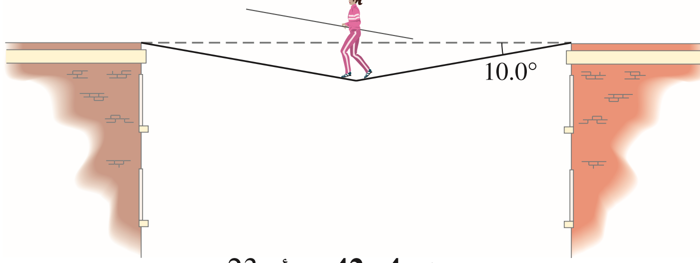


الشكل **4 - 41** المسألة 20.

21. (I) ارسم مخطط جسم حر لكرة بيسبول: (أ) لحظة اصطدامها بالمضرب. (ب) بعد مغادرتها للمضرب وخلال طيرانها مبتعدة باتجاه أرض الملعب.

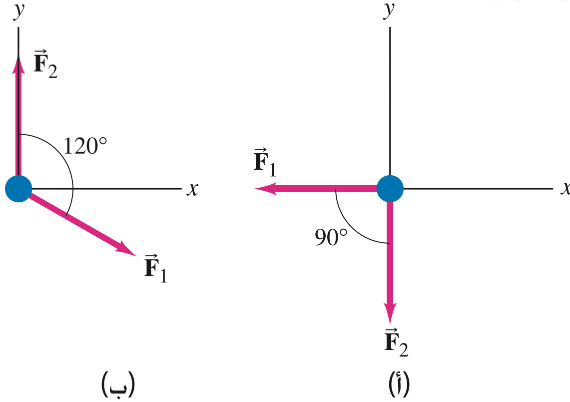
22. (I) تؤثر قوة مقدارها 650-N باتجاه الشمال الغربي. ما اتجاه تأثير قوة أخرى مقدارها 650-N إذا كانت محصلة القوى ستشير باتجاه الغرب؟ مثل إجابتك مستعينًا بمخطط متجه.

23. (II) تسير ليلى على "حبل معلق" مثبت أفقيًّا بين مبنيين يبتعدان مسافة 10.0 m أمتار عن بعضهما بعضًا. يصنع الحبل زاوية مقدارها 10.0° درجات إلى الأسفل عندما تصل ليلى إلى منتصف الحبل. كما هو موضّح في (الشكل 4 - 42). إذا كانت كتلة ليلى 50.0 kg، فما مقدار الشد في الحبل عند تلك النقطة؟



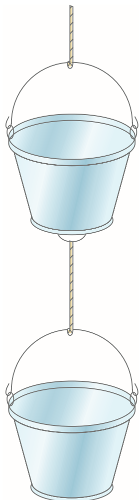
الشكل **4 - 42** المسألة 23.

24. (II) تؤثر القوتان $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ الظاهرتان في (الشكلين 4 – 43أ و ب) (بالنظر إلى الأسفل) على جسم كتلته 27.0-kg موجود على طاولة ملساء. إذا كانت $F_1 = 10.2\,N$ و $F_2 = 16.0\,N$، فأوجد محصلة القوة المؤثرة في الجسم وتسارعه لكل من الحالتين (أ) و (ب).



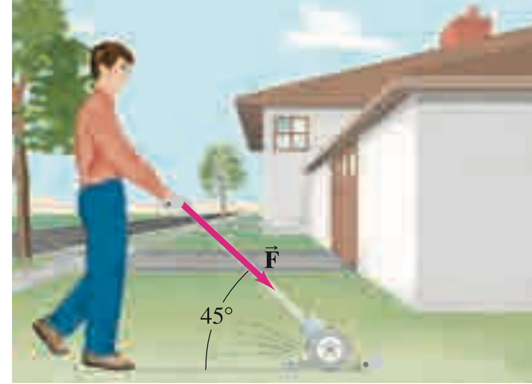
الشكل **4 - 43** المسألة 24.

25. (II) يتدلّى دلو دهان كتلته 3.2-kg معلّق بحبل مهمل الكتلة من دلو دهان آخر كتلته 3.2-kg أيضًا ومعلق بحبل آخر مهمل الكتلة أيضًا. كما في (الشكل 4 - 44).
(أ) ما مقدار الشد في الحبل عند الاتزان.
(ب) احسب الشد في كل حبل عند تسارع المجموعة إلى الأعلى بمعدل $1.60\ m/s^2$ نتيجة سحبهما إلى الأعلى بواسطة الحبل العلوي.



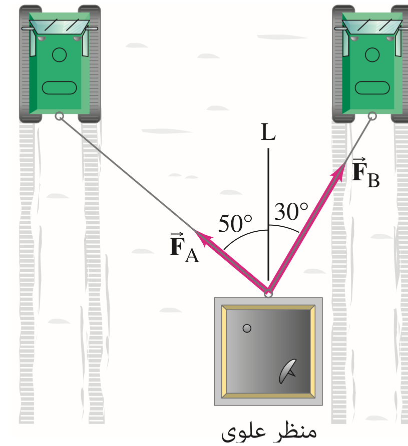
الشكل **4 - 44** المسألة 25.

26. (II) يدفع شخص ما آلة قص عشب كتلتها 14.0-kg بسرعة ثابتة وبقوة $F = 88.0\,\text{N}$ موجهة على امتداد ذراعها التي تصنع زاوية $45.0°$ مع الأفقي (الشكل 4 - 45). (أ) ارسم مخطط جسم حر مظهرًا القوى المؤثرة في الحاصدة جميعها. واحسب (ب) قوة الاحتكاك الأفقية المؤثرة فيها. ثم (جـ) القوة العمودية التي تؤثر بها الأرض رأسيا إلى الأعلى في الحاصدة. وحدد (هـ) القوة الضرورية لكي يؤثر بها شخص في حاصدة العشب ليسرعها من السكون إلى 1.5 m/s خلال 2.5 s آخذًا بعين الاعتبار قوة الاحتكاك نفسها؟



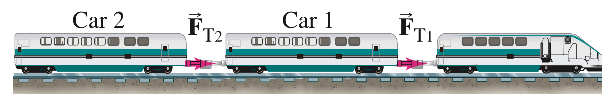
الشكل 4 - **45** المسألة 26.

27. (II) جَرّ كاسحتا جليد وحدةً منزلية إلى موقع جديد في قاعدة "ماكموردو" في القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا). كما هو موضح في (الشكل 4 - 46). وتوازي محصلة القوى $\vec{F}_A$ و $\vec{F}_B$ المؤثرة في الوحدة المنزلية بواسطة الحبال الأفقية الخط. حيث إن $F_A = 4500\,\text{N}$. أوجد F_B وقيمة $\vec{F}_A + \vec{F}_B$.



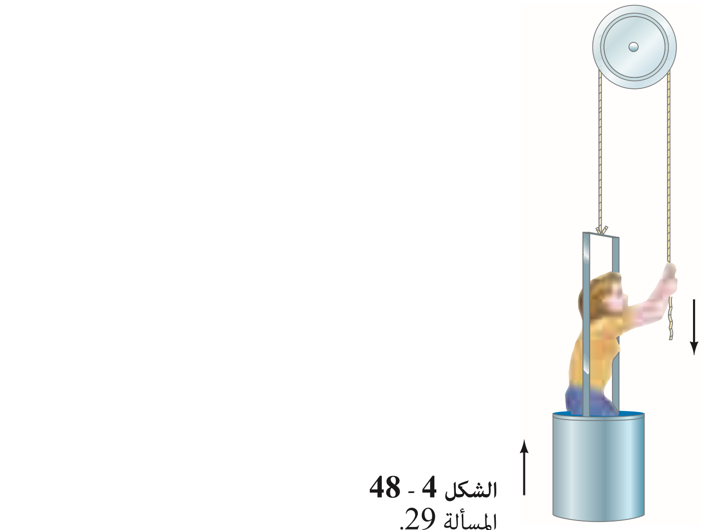
الشكل 4 - **46**
المسألة 27.

28. (II) تسحب عربة قطار عربتين خلفها كتلة كل منهما تعادل كتلتها. كما في (الشكل 4 - 47). حدد نسبة الشد في الوتد بين القاطرة والمقطورة الأولى (F_{T1}) إلى الشد في الوتد بين المقطورة الأولى والثانية (F_{T2}) عندما لا يساوي تسارع القطار الصفر.



الشكل 4 - **47** المسألة 28.

29. (II) تسحب عاملة تنظيف الشبابيك نفسها إلى الأعلى باستخدام آلة (المكونة من البكرة والدلو). كما هو موضح في (الشكل 4 - 48). (أ) ما الشدة التي يجب أن تسحب فيها إلى الأسفل لكي ترتفع ببطء وبسرعة ثابتة؟ (ب) ما مقدار تسارعها عند زيادة القوة بمقدار 15%؟ اعتبر أنّ كتلة عاملة النظافة مع الدلو تساوي 65 kg.



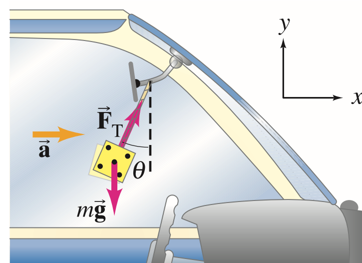
الشكل 4 - **48**
المسألة 29.

30. (II) أثر عدّاء كتلته 65-kg لحظة بدء السباق بقوة 720 N في قاعدة الانطلاق بزاوية مقدارها $22°$ بالنسبة إلى الأرض. (أ) ما تسارع العداء الأفقي؟ (ب) ما سرعة انطلاق العداء إذا استمر تأثيره في قاعدة الانطلاق مدة 0.32 s؟

31. (II) يظهر (الشكل 4 - 49) مكعبًا (كتلته m_A) على سطح أفقي أملس متصل بواسطة حبل رفيع يمرّ فوق بكرة بمكعب آخر (كتلته m_B) معلق رأسيًا. (أ) ارسم مخطط جسم-حر لكل مكعب على حدة مظهرًا قوة الجاذبية وقوة الشد المؤثرة في الحبل، وأي قوة عمودية. (ب) طبق قانون نيوتن الثاني لتحصل على معادلات تسارع النظام والشد في الحبل. اهمل احتكاك البكرة والحبل وكتلتيهما.

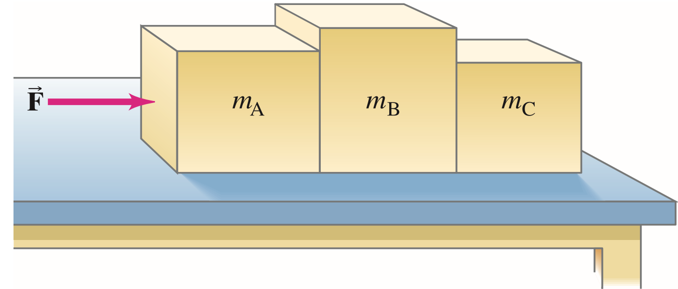
الشكل 4 - **49**
المسألة 31. تجلس الكتلة m_A على سطح أفقي أملس وتتدلى m_B رأسيا.

32. (II) يُعلق زوج من النرد الأجعد بواسطة حبلٍ يتدلّى من المرآة الخلفية لسيارة. ما الزاوية التي سيصنعها الحبل مع الرأسي عندما تتسارع السيارة من السكون عند الإشارة الضوئية إلى سرعة 28 m/s خلال 6.0 s؟ انظر (الشكل 4 - 50).



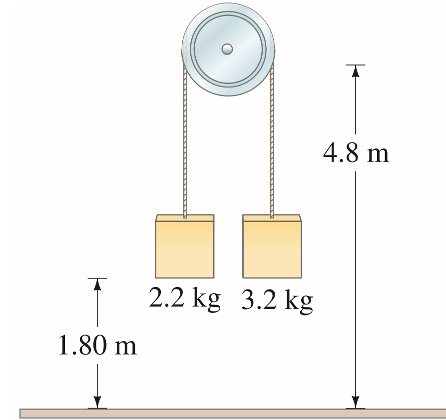
الشكل 4 - **50**
المسألة 32.

33. (III) تلامس ثلاثة مكعبات بعضها بعضًا على سطح أملسٍ أفقي، كما هو موضح في (الشكل 4 - 51). وتؤثر قوة $\vec{F}$ في المكعب A (كتلته m_A). (أ) ارسم مخطط جسم حر لكلّ مكعب. وحدّد: (ب) تسارع النظام (بدلالة m_A و m_B و m_C). (جـ) القوة المحصّلة على كلّ مكعب. (د) قوة التلامس التي يؤثر بها كل مكعب في المكعب المجاور له. (هـ) إذا كانت $m_A = m_B = m_C = 12.0\ kg$ و $F = 96.0\ N$، فاعط قيمًا رقميّةً لكلٍّ من (ب) و (جـ) و (د). هل لإجابتك أي معنىً حسّيٍّ؟



الشكل 4 - 51 المسألة 33.

34. (III) ترتفع كل من الكتلتين الظاهرتين في (الشكل 4 - 52) في بداية الأمر مسافة 1.80 m فوق الأرض، وكذلك البكرة مسافة 4.8 m. ما أقصى ارتفاع ستصل إليه الكتلة الخفيفة عندما يحرر النظام؟ [تلميح : حدّد أولا تسارع الكتلة الخفيفة، ومن ثَمَّ حدّد سرعتها لحظة اصطدام الأخرى بالأرض. وتُعدّ هذه السرعة هي سرعة "الانطلاق" كمقذوف شريطة عدم اصطدامها بالكرة في تلك اللحظة].



الشكل 4 - 52 المسألة 34.

35. (III) لنفترض أن صندوقين على طاولة ملساء يرتبطان ببعضهما بعضًا بواسطة حبل ثقيل كتلته 1.0 kg. احسب تسارع كل صندوق والشد عند نهايتي الحبل مستخدمًا مخطّطي الجسم الحر الظاهرين في (الشكل 4 - 53). افترض أن $F_P = 40.0\ N$، وأهمل أيّ ارتخاء في الحبل. قارن النتائج مع (المثال 4 - 12 والشكل 4 – 22).

4 – 8 قوانين نيوتن بوجود الاحتكاك. السطوح المائلة.

36. (I) إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين صندوق الشحن وسطح الأرض هو 0.30، فما مقدار القوة الأفقية الضرورية لتحريك الصندوق بسرعة ثابتة على الأرض؟ وما مقدار القوة الأفقية الضرورية عندما تكون μ_k مساوية للصفر؟

37. (I) نحتاج إلى قوة تساوي 48.0 N لتحريك صندوق كتلته 5.0-kg على سطح خرساني من السكون. (أ) ما معامل الاحتكاك السكوني بين الصندوق وسطح الأرض؟ (ب) إذا استمر التأثير في القوة نفسها 48.0-N سيتسارع الصندوق بمعدل $0.70\ m/s^2$. فما معامل الاحتكاك الحركي؟

38. (I) افترض أنك تقف داخل قطار يتسارع بمعدل 0.20g. ما أدنى معامل احتكاك سكوني بين أقدامك وأرض القطار يضمن عدم انزلاقك من موضعك؟

39. (I) ما أقصى تسارع تصله سيارة إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين عجلاتها وسطح الطريق هو 0.80؟

40. (II) إنّ معامل الاحتكاك السكوني بين المطاط الصلب وسطح طريق اعتيادي هو 0.8 تقريباً. ما أقصى ميل (أكبر زاوية) منحدر تستطيع أن توقف سيارتك فوقه دون أن تنزلق؟

41. (II) ترك صندوق كتلته 15.0-kg على سطح مائل بدرجة 32° فبدأ الصندوق بالانزلاق إلى أسفل السطح المائل من السكون بتسارع 0.30 m/s^2. أوجد قوة الاحتكاك المعيقة لحركته ومعامل الاحتكاك الحركي.

42. (II) تستطيع سيارة أن تتباطأ بمعدل $-4.80\ m/s^2$ من غير انزلاق لتقف وقوفًا كاملًا على سطح مستوٍ. ما هو تباطؤ السيارة لو أنّ الطريق كان مائلا بزاوية 13° إلى الأعلى؟ افرض معامل الاحتكاك السكوني نفسه.

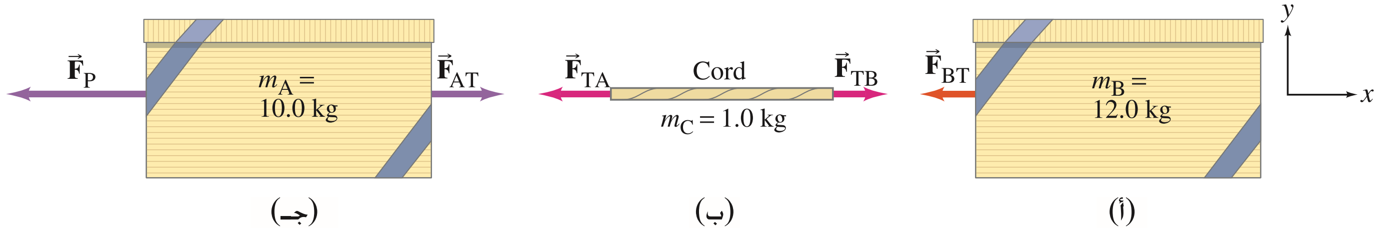
43. (II) يجلس صندوق ساكناً على سطح خشن مائل بزاوية 30°. (أ) ارسم مخطط الجسم الحر مظهرًا القوى المؤثرة في الصندوق جميعها. (ب) كيف سيبدو المخطط خلال انزلاق الصندوق إلى الأسفل على السطح. (جـ) كيف سيتغير المخطط لو أن الصندوق ينزلق إلى الأعلى بعد إعطائه سرعة أولية؟

44. (II) تمتلك عجلات سباق التسارع معامل احتكاك سكوني كبير جداً على السطح الإسفلتي. قدر قيمة معامل الاحتكاك السكوني الضروري لسباق تسارع بلا انزلاق للعجلات وبتسارع ثابت لمسافة 1.0 km خلال 12 s بدءًا من السكون.

45. (II) يعادل معامل الاحتكاك الحركي لزلاجة كتلتها 22-kg على الحلبة 0.10. ما مقدار القوة الضرورية لدفع الزلاجة أسفل سطح مائل يميل بزاوية 6.0° لتصل إلى سرعة 60 km/h عند نهاية مسار طوله 75 m؟

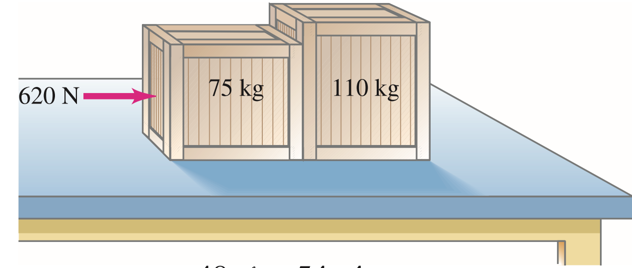
46. (II) من أجل النظام في (الشكل 4 - 32 المثال 4 - 20): ما مقدار الكتلة الضروري للصندوق A كي يمنع حدوث أي حركة؟ افرض أن $\mu_s = 0.30$

47. (II) دفع صندوق فانزلق على سطح الأرض. ما أقصى مسافة سيقطعها الصندوق، علمًا بأن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.20 وسرعة حركته الابتدائية هي 4.0 m/s؟



الشكل 4 - 53 المسألة 35. مخطط جسم حر لصندوقين على طاولة يرتبطان ببعضهما بعضًا بواسطة حبل ثقيل مسحوب إلى اليمين، كما في (الشكل 4 - 44 أ). القوة الرأسية $\vec{F}_N$ و $\vec{F}_G$ غير مبينة.

48. (II) يجلس صندوقا شحن متلامسان كتلتهما 75 kg و 110 kg على سطح أملس من غير حركة (الشكل 4 - 54). وتؤثر قوة مقدارها 620-N في الصندوق ذي الكتلة 75-kg. إذا علمت أن معامل الاحتكاك الحركي يساوي 0.15. فاحسب (أ) تسارع النظام. (ب) القوة التي يُؤثر بها كل صندوق شحن في الآخر. (جـ) أعد الحل بعد استبدال موضع الصندوقين.



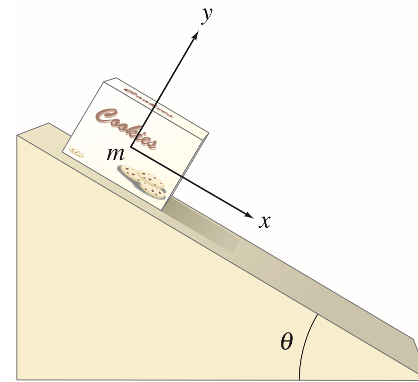
الشكل 4 - 54 المسألة 48.

49. تحمل شاحنة مسطّحة صندوقاً ثقيلًا.فإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين أرضية الشاحنة و الصندوق 0.75. فما أكبر تباطوء للشاحنة يقوم به السائق لتجنب إنزلاق الصندوق إلى غرفة قيادة الشاحنة.

50. تتخوف من إيقاف سيارتك في أيّ يوم جليدي على طريق منزلك الذي ينحدر 12°. بينما انحدار طريق جيرانك 9.0°. وانحدار الطريق الرئيسي 6.0°.فإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين مطاط عجلات السيارة و الجليد 0.15. فأيّ من الطرق المذكورة أكثر أماناً لوقوف سيارتك

51. (II) تنزلق طفلة إلى الأسفل على الزلاجة المائلة بزاوية 28° فتصبح سرعتها عند الأسفل تماما نصف السرعة المفترضة لو أن سطح الزلاجة أملس. احسب قيمة معامل الاحتكاك الحركي بين سطح الزلاجة والطفلة.

52. (II) تستقر علبة كرتونية. كما في (الشكل 4 - 55) على سطح يميل بزاوية $\theta = 22.0°$ مع الأفقي. (أ) إذا كان $\mu_k = 0.12$ فاحسب تسارع العلبة عندما تنزلق على السطح إلى الأسفل. (ب) إذا بدأت العلبة بالانزلاق من السكون من ارتفاع 9.30 m مقارنة بارتفاع قاعدة السطح المائل. فاحسب سرعة العلبة عندما تصل أسفل السطح المائل؟



الشكل 4 - 55 المسألة 48.

53. (II) أعطيت العلبة سرعة ابتدائية مقدارها 3.0 m/s إلى أعلى السطح المائل بزاوية 22.0° كما هو موضح في (الشكل 4 - 55). (أ) ما أبعد مسافة ستصل إليها العلبة؟ و(ب) ما الزمن المستغرق قبل أن تصل العلبة إلى نقطة البداية؟ أهمل الاحتكاك.

54. (II) تصل عربة أفعوانية إلى قمة تلة شديدة الانحدار بسرعة 6.0 km/h. ثم تبدأ بالهبوط عن التلة التي تميل بزاوية متوسطها 45° وطولها 45.0 m. قدر سرعة عربة الأفعوانية عندما تصل إلى أسفل التلة. افرض أن $\mu_k = 0.18$.

55. (II) تُرك صندوق كتلته 18.0-kg ليتسارع بمعدل $0.270\ m/s^2$ إلى أسفل سطح مائل يميل بزاوية 37.0°. أوجد قوة الاحتكاك المعيقة للحركة. وما مقدار معامل الاحتكاك الحركي؟

56. (II) ثُبت صندوق صغير في موضعه مقابل حائط خشن عن طريق دفعه بقوة تميل إلى الأعلى بزاوية 28° فوق الأفقي. إذا علمت أن معاملا الاحتكاك السكوني والحركي بين الصندوق والحائط هما 0.40 و 0.30 على الترتيب. وإذا كان الصندوق سينزلق إلى الأسفل عندما تقل قيمة القوة عن 13 N. فما كتلة الصندوق؟

57. (II) تصبح أكوام الثلج على الأسطح الزلقة مقذوفات خطيرة عندما تبدأ بالذوبان. خذ بنظر الاعتبار كتلا كبيرة من الثلج عند كتف سطح مائل بدرجة 30°: (أ) ما أدنى قيمة لمعامل الاحتكاك السكوني، التي ستحول دون انزلاق الثلج إلى الأسفل. و(ب) عندما يبدأ الثلج بالذوبان تبدأ قيمة معامل الاحتكاك السكوني بالنقصان تدريجيا لينزلق الثلج عن السطح في نهاية الأمر. افترض أن المسافة بين كتله الثلج وحافة سطح المنزل هي 5.0 m وأن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.20 واحسب سرعة انزلاق كتله الثلج عن السطح. و(جـ) ما سرعة اصطدام الثلج بالأرض إذا علمت أن السطح يرتفع مسافة 10.0 m عن سطح الأرض؟

58. (III) (أ) ما أدنى مسافة للوقوف الكامل لسيارة تسير بسرعة $v^2/2\mu_s g$ حيث يمثل μ_s معامل الاحتكاك السكوني بين العجلات والطريق و g تسارع الجاذبية. و(ب) ما المسافة التي تقطعها سيارة كتلتها 1200-kg تسير بسرعة 95 km/h إذا كان $\mu_s = 0.75$؟

59. (III) ينزلق كوب قهوة إلى الأمام على الرف الأمامي لسيارة عندما تتباطأ إلى السكون من 45 km/h خلال 3.5 s أو أقل. ولا يعود هذا الكلام صحيحا إذا استغرق تباطؤ السيارة زمنا أطول من ذلك. فما معامل الاحتكاك السكوني بين الكوب وسطح الرف الأمامي؟

60. (III) أعطي مكعب صغير كتلته m سرعة ابتدائية v_0 فبدأ بالانزلاق إلى أعلى سطح مائل يميل بزاوية θ عن المستوى الأفقي. إذا استمر المكعب بالانزلاق إلى الأعلى ليقطع مسافة d قبل أن يقف تماما فأوجد معادلة لمعامل الاحتكاك الحركي بين السطح المائل والمكعب.

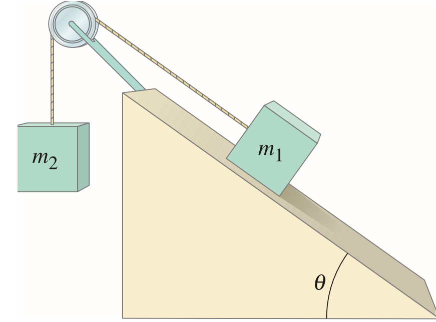
61. (III) أسند متسلق كتلته 75-kg. كما في (الشكل 4 - 56) نفسه داخل "مدخنة" بواسطة قوى الاحتكاك المؤثرة في حذائه وظهره. إذا علمت أن معاملي الاحتكاك السكوني بين الحائط وحذائه والحائط وظهره هما 0.80 و0.60 على الترتيب فما هي أدنى قوة عمودية يجب أن يؤثر فيها؟ افترض أن الجدران رأسية وأن القوتين عظميين. وأهمل تأثير قبضة الحبل.



الشكل 4 - 56 المسألة 61.

62. (III) تتحرك الصناديق على حزام الشحن من منطقة تحميلها إلى محطة التغليف على بعد 11.0 m. ويبدأ الحزام المتحرك بالحركة من السكون وينهي تحركه بالوقوف التام. وتتم أسرع عملية نقل عندما يتسارع الحزام خلال نصف المسافة، ثم يبدأ بالتباطؤ خلال نصف المسافة الثاني. وإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين الحزام والصندوق هو 0.60، فما أقل زمن مستغرق لنقل الصندوق؟

63. (III) يركد مكعب (كتلته m_1) على سطح أملس ويرتبط بمكعب آخر كتلته m_2 بواسطة حبل مهمل الكتلة يمر فوق بكرة، كما هو موضح في (الشكل 4 - 57). (أ) أوجد معادلة لتسارع النظام المكون من المكعبين بدلالة m_1 و m_2 و θ و g. (ب) ما الظروف الواجب تطبيقها على الكتلتين m_1 و m_2 للتحكم في اتجاه تسارع النظام (ولتكن باتجاه m_1 إلى الأسفل) أو بالاتجاه المعاكس؟



الشكل 4 - 57.
المسألة 63 و 64.

64. (III) (أ) افترض أن معامل الاحتكاك الحركي بين m_1 والسطح في (الشكل 4-57) هو $\mu_k = 0.15$ وأنّ $m_1 = m_2 = 2.7\,\text{kg}$. وحدد قيمة تسارع m_1 و m_2 عندما تتحرك m_2 إلى الأسفل. علمًا بأن $\theta = 25°$.
(ب) ما أقل قيمة لـ μ_k التي ستمنع النظام من التسارع؟

65. (III) يستطيع دراج كتلته (مع دراجته) 65 kg الانطلاق إلى أسفل تلة تميل بزاوية 6.0° بسرعة ثابتة 6.0 km/h بسبب مقاومة الهواء. ما مقدار القوة الضرورية ليتسلق الدراج عائدا بدراجته بالسرعة نفسهاوتحت تأثير مقاومة الهواء السابقة نفسها ؟

مسائـل عامة

66. يضخ قلب الثدييات بناءً على النموذج المبسط للقلب في كلِّ نبضةٍ ما مقداره 20 g من الدم المسرع من 0.25 m/s إلى 0.35 m/s خلال مدّة زمنية مقدارها 0.10 s. فما مقدار القوة التي تؤثر فيها عضلة القلب؟

67. هناك فرصة معقولة لنجاة شخص ما من حادث تصادم سيارة إذا كان التباطؤ لا يتعدى 30 ضعفًا تسارع الجاذبية الأرضية. فاحسب القوة على شخص ما كتلته 70-kg يخضع لهذا التسارع. وما المسافة التي يقطعها شخص ما إذا أرغم على الوقوف التام بالمعدل السابق نفسه من سرعة 100 km/h؟

68. (أ) إذا كان التسارع الناشئ عن زلزال هو a. ومع هذا استطاع جسم ما أن يبقى ساكنا في موضعه. فأثبت أن أقل معامل احتكاك سكوني للجسم مع الأرض هو $\mu_s = a/g$. و(ب) أنتج الزلزال الشهير (لوما بريتا) على شاطئ مدينة سان فرانسيسكو في ولاية كاليفورنيا تسارعا أرضيا يعادل $4.0\ \text{m/s}^2$ مما تسبب في إيقاف دوري البيسبول عام 1989. فهل كانت مقاعد ملعب البيسبول ستبدأ بالتحرك على السطح لو أن السطح كان مغطى بمادة ذات معامل احتكاك سكوني يعادل 0.25؟

69. تسحب سيارة كتلتها 1150-kg مقطورة كتلتها 450 kg. وتؤثر السيارة بقوة أفقية في الأرض تعادل $3.8 \times 10^3\,\text{N}$ لتبدأ بالتسارع. فما مقدار القوة التي تؤثر بها السيارة في المقطورة؟ افترض أن معامل الاحتكاك الفاعل للمقطورة هو 0.15.

70. فحص محققو الشرطة موقع حادث تصادم سيارتين فاكتشفوا أن طول أثر انزلاق إحدى السيارتين على سطح الطريق التي كانت على وشك الوقوف التام قبل التصادم مباشرة يُعادل 72-m. فإذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين العجلات وسطح الطريق هو 0.80 تقريبا. فقدّر السرعة الابتدائية للسيارة على سطح هذا الطريق المستوي.

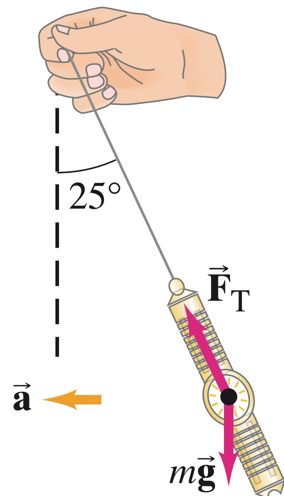
71. بدأت سيارة بالتدحرج إلى أسفل تلة تدعى 1– لكل – 4 (ويعني هذا أنه وعلى امتداد الطريق كل مسافة 4 m يختلف الارتفاع بمعدل 1m). فما سرعة السيارة عندما تصل إلى أسفل التلة بعد قطعها مسافة 55 m؟ (أ) اهمل الاحتكاك. (ب) افرض أن معامل احتكاك فاعل مقداره 0.10.

72. أسقطت حقيبة يد كتلتها 2.0-kg من أعلى برج "بيزا" المائل لتقطع مسافة 55 m قبل أن تصطدم بالأرض بسرعة 29 m/s. فما متوسط قوة مقاومة الهواء؟

73. يسير دراج بسرعة ثابتة تعادل 12 m/s ثم يدخل منطقة موحلة حيث معامل الاحتكاك الفاعل عندها يعادل 0.60. فهل سينجح الدراج في الخروج من هذه المنطقة الموحلة وطولها 11 m من غير أن يحتاج إلى الضغط على دواسات الدراجة؟ إذا كانت الإجابة نعم، فما سرعته لحظة الخروج؟

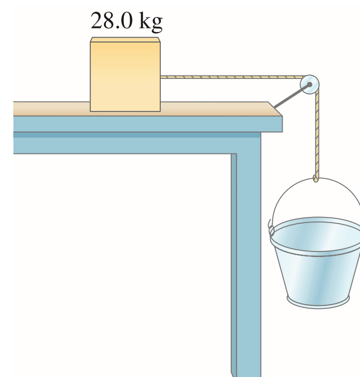
74. يقوم مهندس تصميم مدن بإعادة تصميم سفح جبلي من المدينة . ومن الاعتبارات المهمة جداً هي درجة ميل الطرق التي تمكن أضعف السيارات من صعود التلال من غير أن تتباطأ. فإذا كانت سيارة صغيرة كتلتها 1100 kg قادرة على التسارع على السطح المستوى من السكون إلى 21 m/s (75 km/s) خلال 14.0 s. فاحسب أقصى ميل ممكن للتلة باستخدام هذه البيانات.

75. ميساء، التي تحب تجارب الفيزياء، تترك ساعتها لتتدلى من حبل رفيع وهي مسافرة بالطائرة. فتلاحظ أن الحبل والساعة يصنعان زاوية 25° مع الرأسي عند إقلاع الطائرة من مطار عمان الذي يستغرق 18 s، كما في (الشكل 4 - 58). قدّر سرعة إقلاع الطائرة.



الشكل 4 - 58.
المسألة 75.

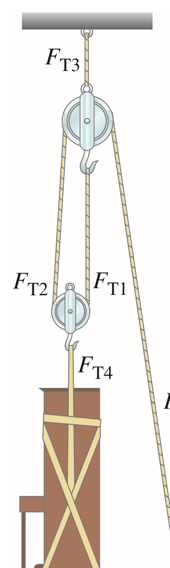
.76 يرتبط مكعب كتلته 28.0-kg بدلو فارغ كتلته 1.35-kg بواسطة حبل يمر حول بكرة عديمة الاحتكاك (الشكل 4 - 59). إذا علمت أن معامل الاحتكاك السكوني بين سطح الطاولة والمكعب هو 0.450 وأن معامل الاحتكاك الحركي بين سطح الطاولة والمكعب هو 0.320 وأن رملا قد أضيف تدريجيا إلى الدلو ليكاد يبدأ النظام بالتحرك فاحسب. (أ) كتلة الرمال التي أضيفت إلى الدلو. (ب) تسارع النظام.



الشكل **4 - 59** المسألة 76.

.77 عند تصميم الأسواق المركزية يؤخذ بعين الاعتبار وجود عدة طرق مائلة تربط بين أنحاء السوق المختلفة. وبما أن المتسوقين يدفعون عربات المشتريات إلى أعلى هذه الطرق المائلة، فمن الطبيعي أن لا تكون الحركة فوقها صعبة. ونتيجة الدراسة التي أعدها مهندس مختص اكتشف أن الناس لن تتذمر إذا كانت القوة الضرورية للدفع فوق السطوح المائلة لا تتعدى 20 N. فما أقصى زاوية بناء θ للمنحدرات إذا كانت العربات تتحمل 30-kg من المشتروات؟ أهمل الاحتكاك.

.78 (أ) ما أقل قوة F ضرورية لرفع آلة بيانو (كتلتها M) باستخدام منظومة البكرة الموضحة في (الشكل 4 - 60)؟ (ب) حدد مقدار الشد في كل جزء من الحبل : F_{T1} و F_{T2} و F_{T3} و F_{T4}.



الشكل **4 - 60** المسألة 78.

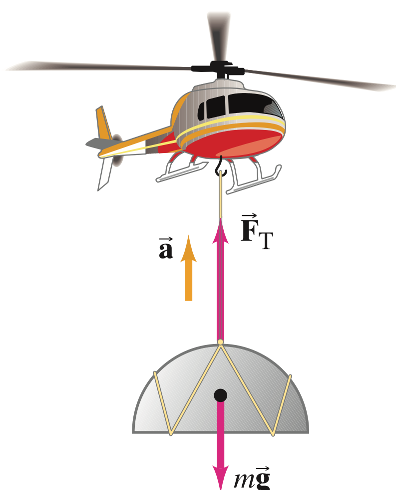
.79 تتسارع طائرة نفاثة بمعدل $3.5\ m/s^2$ وبزاوية °45 فوق الأفق. فما القوى الكلية التي يؤثر بها مقعد غرفة القيادة في طيار كتلته 75-kg؟

.80 خلال عملية تصميم مقعد أمان الطفل، يأخذ المهندس بنظر الاعتبار الظروف التالية: تجلس طفلة كتلتها 12-kg في مقعد الأمان المثبت ومحكم التقييد في مقعد السيارة. (الشكل 4 - 61). وتصطدم السيارة اصطداما مباشرا بسيارة أخرى. وتتناقص سرعة السيارة من سرعة ابتدائية v_0 تعادل 45 km/h إلى الصفر خلال 0.20 s نتيجة التصادم. فقدر محصلة القوى الأفقية F التي يؤثر بها حزام أمان مقعد الطفلة فيها ليبقيها في موضعها خلال التصادم مفترضاً تباطؤًا ثابتًا. تعامل مع الطفلة وكأنها جسم نقطي واذكر أي فرضيات أخرى تم اتخاذها خلال التحليل.



الشكل **4 - 61** المسألة 80.

.81 تتسارع طائرة عمودية كتلتها 7650-kg إلى الأعلى بمعدل $0.80 m/s^2$ وهي ترفع إطار كتلته 1250-kg في موقع إنشاءات. (الشكل 4 - 62). (أ) ما مقدار قوة الرفع التي يؤثر بها الهواء في مراوح الطائرة العمودية؟ (ب) ما مقدار الشد في الحبل (أهمل كتلته) الذي يربط الإطار مع الطائرة العمودية؟ (جـ) ما مقدار القوة التي يؤثر بها الحبل في الطائرة العمودية؟



الشكل **4 - 62** المسألة 81.

.82 قطار إيطالي عظيم السرعة يتكون من 12 عربة كتلته 660 طنا متريا (660,00 kg) ومع أنه يستطيع أن يؤثر بقوة أفقية عظمى تعادل 400 kN في السكة. فإنه يؤثر بقوة تعادل 150 kN في السكة عندما يصل إلى سرعته العظمى (300 km/h). فاحسب (أ) تسارعه الأعظم. (ب) قدر قيمة قوة ممانعة الهواء عند أعظم سرعة.

.83 تنطلق متزلجة على الجليد كتلتها 65-kg من غير أن تبذل أي مجهود لمسافة 75 m إلى أن تتوقف. فإذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين زلاجتيها والجليد هو $\mu_k = 0.10$، فما سرعتها الابتدائية لحظة بدء انطلاقتها؟

84. يستخدم متسلقا صخور، خالد وشهد، حبال أمان بأطوال متماثلة. ويُعدّ حبل شهد الأكثر مرونة. ويسميه المتسلقون بالحبل الديناميكي. أما حبل خالد فيسمى *بالحبل الستاتيكي* (الثابت). ولا ينصح فيه خلال تسلق المحترفين لأسباب عديدة ومنها الأمان. وإذا سقطت شهد سقوطا حرا مسافة 2.0 m فسيعمل الحبل على إيقافها خلال مسافة 1.0 m (الشكل 4 - 63): (أ) قدر قيمة القوة الثابتة التي ستشعر بها شهد من الحبل مفترضا أن القوة ثابتة. (عبّر عن إجابتك بدلالة مضاعفات وزنها). (ب) إذا سقط خالد بطريقة شهد نفسها سقوطا حرا مسافة 2.0 m فسيتمدد حبله مسافة 30 cm فقط. احسب مقدار القوة التي سيؤثر بها الحبل فيه خلال إيقافه بدلالة مضاعفات وزنه. وأيّ المتسلقين سيتألم أكثر؟

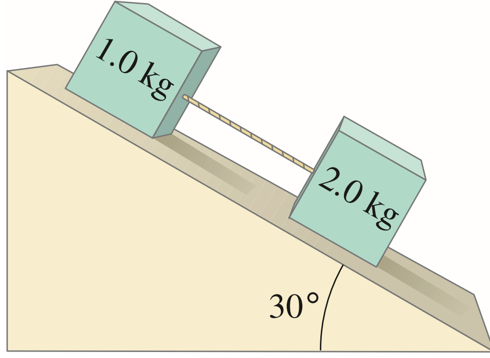


الشكل 4 - 63
المسألة 84.

85. يستخدم صياد في قاربه حبل صيد مصنف بـ (اختبار 10-lb). وهذا يعني أن الحبل يستطيع أن يؤثر بقوة 45 N قبل أن ينقطع (1 lb = 4.45 N) (أ) ما أثقل سمكة يستطيع الصياد رفعها بخيطه رأسيًا من الماء إلى الأعلى بسرعة ثابتة ووضعها على قاربه؟ (ب) إذا تسارعت السمكة إلى الأعلى بمعدل $2.0\ m/s^2$. فما أثقل وزن سمكة يستطيع الصياد رفعه بخيطه ووضعه بأمان فوق قاربه. (جـ) هل من الممكن رفع سمكة سلمون مرقط كتلتها 15-lb بحبل اختبار 10-lb بأمان؟ لماذا نعم أو لماذا لا؟

86. تم السماح لمصعد في مبنى طويل بالوصول إلى سرعة عظيمة تعادل 3.5 m/s خلال نزوله. فما مقدار الشد الناتج في حبل المصعد الضروري لإيقافه خلال مسافة 2.6 m إذا كانت كتلة المصعد تعادل 1300 kg بما فيها كتل راكبيه؟

87. وضع صندوقان كتلة أحدهما $m_1 = 1.0\ kg$ ومعامل احتكاكه الحركي 0.10 وكتلة الآخر $m_2 = 2.0\ kg$ ومعامل احتكاكه الحركي 0.20 على سطح يميل بزاوية $\theta = 30°$. (أ) ما تسارع كل صندوق؟ (ب) إذا ربط الصندوقان بحبل مشدود (الشكل 4 - 64) حيث m_2 إلى الأسفل. فاحسب تسارع كل من الصندوقين؟ (جـ) احسب تسارع الصندوقين إذا تم عكس موضعيهما الابتدائيين.



الشكل 4 - 64 المسألة 87.

88. يقف شخص كتلته 75.0-kg على ميزان في مصعد. فما قراءة الميزان (بدلالة النيوتن والكيلوجرام) عندما يكون المصعد: (أ) ساكنا. (ب) صاعدا بسرعة ثابتة 3.0 m/s. (جـ) هابطًا بسرعة 3.0 m/s. (د) متسارعًا إلى الأعلى بمعدل $3.0\ m/s^2$. (هـ) متسارعًا إلى الأسفل بمعدل $3.0\ m/s^2$؟

89. يصعد ثلاثة متسلقي جبال، ربطوا أنفسهم بالحبال ببعض، حقلاً جليدياً يميل بزاوية 21.0° عن المستوى الأفقي. فإذا انزلق المتسلق الأخير ساحباً معه المتسلق الثاني، وكان المتسلق الأول قادرًا على حملهما معاً، وكانت كتلة كل متسلق 75 kg. فاحسب الشد في كلّ جزء من الحبل بين المتسلقين الثلاثة. اهمل الاحتكاك بين الجليد والمتسلقين المنزلقين.

إجابات التمارين

أ: (أ) متشابهان. (ب) سيارة السباق. (جـ) القانون الثالث للبند (أ) والقانون الثاني للبند (ب).

ب: القوة التي يؤثر بها الشخص غير كافية لإبقاء الصندوق متحركاً.

جـ: لا. ونعم.

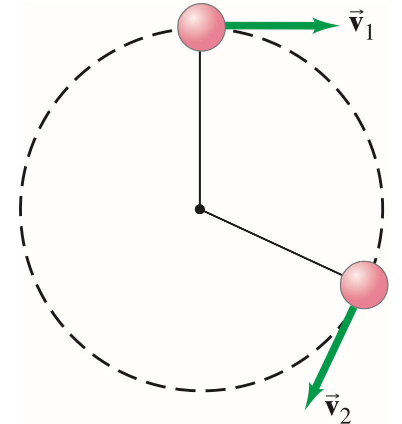
د: نعم. ولا.



يعمل روّاد الفضاء في الجزء العلويّ الأيسر من الصورة في مكّوك الفضاء. إنّهم يشعرون بانعدام وزنهم الظاهريّ بسبب سرعة دورانهم العالية حول الأرض. ويدور القمر أيضًا كما هو ظاهر في الصّورة حول الأرض بسرعة عالية. كما يخضع كلّ من مكّوك الفضاء والقمر في مداريهما شبه الدّائريين إلى تسارع مركزيّ. فما الذي يمنع القمر ومكّوك الفضاء (ورواد الفضاء) من التّحرك مبتعدين عن الأرض في خطّ مستقيم؟ إنّها قوّة الجاذبية الأرضيّة. ينصّ قانون نيوتن للتّجاذب الكونيّ على أنّ أيّ جسمين يتجاذبان بقوة يتناسبان طرديًّا مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما.

الفصل 5

الحركة الدّائريّة والجاذبيّة



الشكل 5 – 1 جسم صغير يتحرك على محيط دائرة، ويظهر كيفية تغير السرعة المتجهة. اتجاه السرعة اللحظية عند كلّ نقطة هو المماس للمسار الدائري.

يتحرّك جسم ما في خط مستقيم إذا كانت القوة المؤثرة فيه تعمل باتّجاه حركته، أو عندما تكون محصلة القوى المؤثرة فيه تساوي صفرا. أما إذا كان اتّجاه محصلة القوى يميل بزاوية ما عن اتّجاه حركة الجسم عند أيّ لحظة، فإنّ الجسم سيبدأ بالحركة في طريق منحنٍ. وتُعدّ حركة المقذوفات كما نوقشت في الفصل الثالث أفضل مثال على ما ذكر. كما يُعدّ الجسم المتحرك على محيط دائرة مثالا مهمّا آخر على ذلك، مثل حركة الكرة المثبتة بنهاية حبل والمرغمة على الدوران حول رأس شخص ما، أو حركة القمر شبه الدائرية حول الأرض.

وسندرس في هذا الفصل الحركة الدائرية للأجسام، وطرق تطبيق قوانين نيوتن في الحركة. وسنناقش كذلك كيفية توصُّل نيوتن إلى قانون مهم آخر نتيجة تطبيقه لمبادئ الحركة الدائرية على حركة كلّ من القمر والكواكب الأخرى. وهذا ما ساعد نيوتن لاحقًا على صياغة قانون التجاذب الكونيّ الذي يعدّ حجر الأساس في تحليله للعالم المادّيّ.

5-1 كينماتيكا الحركة الدائرية المنتظمة

يقال للجسم الذي يتحرك على محيط دائرة بسرعة ثابتة مقدارها v بأنه يخضع **لحركة دائرية منتظمة**. وفي هذه الحالة، تبقى قيمة سرعته المتجهة ثابتة، في حين يتغير اتّجاه هذه السرعة باستمرار نتيجةً للحركة الدائرية (الشكل 5 – 1). ولأنّ التّسارع يعرّف على أنه معدل تغير

السرعة الانتقالية المتجهة. فإن تغير اتجاه هذه السرعة يحدث تسارعًا. مثلما كان تغير قيمة السرعة المتجهة يسببها. وعليه، فإنّ الجسم الذي يتحرك في مسار دائريّ يتسارع باستمرار، حتى وإن بقيت قيمة سرعته ثابتة $(v_1 = v_2 = v)$. ولنتفحص هذا التسارع الآن بتمعن أكبر: لقد تمّ تعريف التسارع كالتالي:

$$\vec{\mathbf{a}} = \frac{\vec{\mathbf{v}}_2 - \vec{\mathbf{v}}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{v}}}{\Delta t}$$

تمثل $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ التّغير في السّرعة المتجهة خلال الفترة الزمنية القصيرة Δt. وسوف نتناول الآن الحالة التي يكاد يصل الزمن Δt خلالها إلى الصفر، لنشتق عندها قيمة التسارع اللحظي. وسوف نفترض الآن، كما في (الشكل $5 - 2$)، أنّ Δt لا تصل إلى الصفر لكي يصبح الرسم التوضيحي أكثر سهولة في إيصال المفهوم . وخلال الفترة الزمنية Δt، يتحرك الجسم، كما في (الشكل $5 - 2$ أ)، من النقطة أ إلى النقطة ب، قاطعًا مسافة Δl على القوس الذي يحيط بزاوية مقدارها $\Delta\theta$. وأنّ التغير في متجه السرعة هو: $\vec{\mathbf{v}}_2 - \vec{\mathbf{v}}_1 = \Delta\vec{\mathbf{v}}$ كما هو واضح في (الشكل $5 - 2$ ب). وعندما نختار قيمة Δt لتكون صغيرة جدّا، فسينعكس ذلك على كلّ من Δl و $\Delta\theta$ لتكونان صغيرتين أيضًا، ولتصبح $\vec{\mathbf{v}}_2$ وكأنها موازية تماما لـ $\vec{\mathbf{v}}_1$. وعليه، سنجد أنّ $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ تكاد تكون عمودية تمامًا عليهما (الشكل $5 - 2$ جـ). وهكذا، فإن $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ ستشير باتجاه مركز الدائرة. وبما أنّ $\vec{\mathbf{a}}$ بالتعريف تشير إلى اتجاه $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ نفسه، فهي إذن ستشير إلى مركز الدائرة أيضًا. ومن هنا جاءت تسمية هذا التسارع بالتسارع الباحث عن المركز أو **التسارع المركزي**، أو التسارع القطري (نتيجة اتجاهه الموازي لنصف قطر الدائرة) ويرمز إليه بـ $\vec{\mathbf{a}}_R$.

أما الآن، فسنحدد قيمة هذا التسارع المركزي (القطري)، a_R. بما أنّ الضلع جـ أ في (الشكل $5 - 2$ أ) عمودي على $\vec{\mathbf{v}}_1$ ، والضلع جـ ب عمودي على $\vec{\mathbf{v}}_2$، فإنّ الزاوية $\Delta\theta$ (الزاوية المحصورة بين كلّ من الضلعين جـ أ و جـ ب) هي الزاوية ذاتها المحصورة بين $\vec{\mathbf{v}}_1$ و $\vec{\mathbf{v}}_2$. أي أنّ المتجهات $\vec{\mathbf{v}}_1$ و $\vec{\mathbf{v}}_2$ و $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ في (الشكل $5 - 2$ ب) تشكل مثلثًا متماثلًا* هندسياً مع المثلث جـ أ ب المبين في (الشكل $5 - 2$ أ). وعندما نأخذ $\Delta\theta$ على أنها زاوية صغيرة جدّا (عن طريق إرغام Δt على أن تكون صغيرة جدّا) ونضع $(v = v_1 = v_2)$ نتيجة ثبات قيمة السرعة المتجهة، فإننا نستطيع كتابة :

$$\frac{\Delta v}{v} \approx \frac{\Delta l}{r}$$

وهي متساوية بالتأكيد في حال اقتراب قيمة Δt من الصفر، التي عندها سيتعادل طول القوس مع طول الوتر أب. ولمعرفة قيمة التسارع اللحظي؛ نجعل قيمة Δt تقترب من الصفر، ونضع إشارة مساواة بدلًا من التقريب في العلاقة السابقة؛ أي أنّ

$$\Delta v = \frac{v}{r}\,\Delta l$$

وللحصول على التسارع المركزي، a_R ، نقسم Δv على Δt:

$$a_R = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{r}\frac{\Delta l}{\Delta t}$$

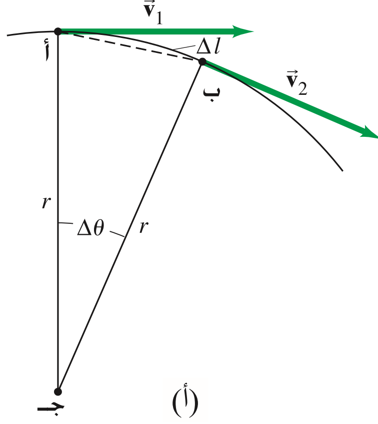
ولكن $\Delta l/\Delta t$ هي السرعة الخطية v للجسم. وعليه، فإنّ

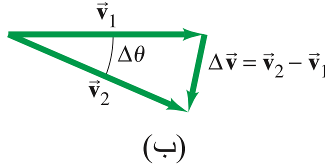
$$a_R = \frac{v^2}{r}. \qquad \textbf{(1 – 5)}$$

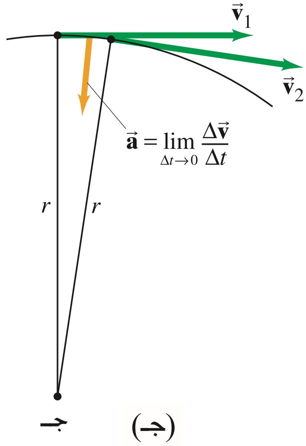
وُتعدّ (المعادلة $5 - 1$) صحيحة في الحالات جميعها التي تشمل سرعة v المتغيرة. وباختصار، فإنّ الجسم الذي يقطع محيط دائرة نصف قطرها r، بسرعة ثابتة v ، يمتلك تسارعًا يشير باتجاه مركز الدائرة، وتبلغ قيمته $a_R = v^2/r$. وكلما ازدادت قيمة سرعة الجسم v، يُغيّر اتجاه هذه السرعة المتجهة بسرعة أكبر، وكلما ازداد نصف قطر المسار، قلّت السرعة التي يتغير عندها اتجاه سرعته المتجهة.

* يحتوي الملحق أ على مراجعة الهندسة

الشكل 5 – 2 تحديد التغير في السرعة $\Delta\vec{\mathbf{v}}$ المتجهة لجسم يتحرك في مسار دائري. والطول Δl هو المسافة على امتداد القوس من A إلى B.







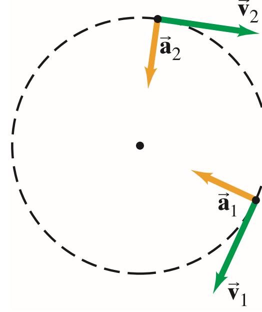
سارع مركزي (قطري)

تنويه:

تبقى قيم السرعة ثابتة خلال الحركة الدائرية المنتظمة. ومع هذا، فإنّ التسارع لا يساوي صفرًا.

وعلى الرغم من أنّ التسارع يشير إلى مركز الدائرة، فإنّ متجه السرعة يشير دائما إلى اتجاه الحركة، وهو مماس للدائرة. وعليه، فإنّ كلا من متجهي التسارع المركزي والسرعة متعامدان على بعضهما بعضًا عند كلّ نقطة خلال المسار المعرّف في هذه الحركة الدائرية المنتظمة (الشكل 5 – 3). ويمكن عدّ الحركة الدائرية مثالًا آخر يؤكد خطأ الفرضية القائلة بأنّ السرعة والتسارع يجب أن يشيرا إلى الاتجاه نفسه. إنّ $\vec{\mathbf{a}}$ و $\vec{\mathbf{v}}$ متجهان متوازيان لجسم يسقط سقوطا حرّا، أمّا بالنسبة إلى الحركة الدائرية، فهما غير متوازيين بل إنّهما متعامدان (ولقد ظهر هذا جليًا بأنهما متجهان غير متوازيين خلال عرضنا لحركة المقذوفات، البند 3 – 5).

تنويه:
متجهـا الحركــة ($\vec{\mathbf{v}}$) والتســارع ($\vec{\mathbf{a}}$) ليســا في الاتجاه نفسه بل هما متعامدان: $\vec{\mathbf{a}} \perp \vec{\mathbf{v}}$.



الشكل 5 – 3 تكون $\vec{\mathbf{a}}$ عمودية على $\vec{\mathbf{v}}$ دائما خلال الحركة الدائرية المنتظمة.

الزمن الدوري والتردد

وغالبا ما توصف الحركة الدائرية لجسم ما بدلالة **تردّده** f، وهي عدد الدورات الكاملة التي يقطعها جسم خلال الثانية الواحدة. إنّ **الزّمن الدّوري** T لجسم يتحرك على محيط دائرة، هو الزمن اللازم لهذا الجسم ليمسح محيط الدائرة مرة واحدة خلال دورة كاملة. ويرتبط التردد وزمن الدورة الواحدة بالعلاقة التالية:

$$T = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(2 – 5)}$$

فعلى سبيل المثال، إذا كان تردد جسم ما 3 دورات/ث، فإنه سيحتاج إلى $\frac{1}{3}$s لكي يمسح دائرة كاملة. ونستطيع أن نكتب لجسم يدور دورة كاملة حول محيط دائرة $(2\pi r)$ بسرعة ثابتة v:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

المثال 5-1 تسارع كرة دوّارة

تدور كرة كتلتها 150-g مثبتة بنهاية حبل بانتظام في دائرة أفقية نصف قطرها 0.600 m، كما في (الشكل 5 – 1 أو 5 – 3). ما مقدار التسارع المركزي للكرة إذا قطعت الكرة دورتين كاملتين في الثانية الواحدة؟

النّهج: يعطى التسارع المركزي بالعلاقة التالية: $a_R = v^2/r$، ويمكن حساب السرعة v بدلالة نصف القطر r، والتردد f.

الحــــلّ: بما أنّ الكرة تقطع دورتين كاملتين خلال الثانية الواحدة، فإنّ الكرة سوف تمسح دائرة كاملة خلال $0.500\ s$، وهو ما يمثل زمن الدورة الواحدة T. إنّ المسافة المقطوعة خلال هذه الفترة هي محيط الدائرة $2\pi r$ ، حيث إن r هو نصف قطر الدائرة. وعليه، فإنّ سرعة الكرة:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3.14)(0.600\ \text{m})}{(0.500\ \text{s})} = 7.54\ \text{m/s}$$

ويصبح التسارع المركزي*:

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(7.54\ \text{m/s})^2}{(0.600\ \text{m})} = 94.7\ \text{m/s}^2$$

التّمرين أ: ما معامل تضاعف التسارع المركزي إذا ما تضاعف طول الحبل إلى 1.20 m وبقيت المعطيات الأخرى جميعها دون تغيير؟

* تعتمد الاختلافات في المنزلة الأخيرة لقيمة السرعة v على ما يتم قراءته من الآلة الحاسبة (التي تعطي $a_R = 94.7\ \text{m/s}^2$)، ولكن عند استخدام $\pm 0.1\ \text{m/s}$ فسيكون الناتج $a_R = 94.8\ \text{m/s}^2$. ويمكن اعتبار القراءتين السابقتين صحيحتين بناء على درجة الدقة المقبولة، وهي $v = 7.54\ \text{m/s}$ (البند 1 – 4).

المثال 2-5 تسارع القمر المركزيّ

احسب تسارع القمر باتّجاه الأرض عندما يقترب نصف قطر مسار القمر الدائريّ حول الأرض من 384,000 km. وزمن الدورة الكاملة T من 27.3 يوما.

النهج: علينا إيجاد السرعة v للحصول على a_R. ويعدّ استخدام نظام الوحدات الدولي (SI) ضروريًّا لتكون وحدة v المستخدمة هي m/s.

الحــــلّ: عندما يدور القمر حول الأرض، فهو يقطع مسافة $2\pi r$ خلال الدورة الواحدة الكاملة. علمًا بأنّ قيمة نصف قطر المسار الدائري هي $r = 3.84 \times 10^8$ m. إنّ الزمن اللازم لكي يقطع القمر دورة واحدة كاملة هو 27.3 يوم (d). وعليه، سنستخدم المعادلة التالية لحساب سرعة القمر في مساره حول الأرض: $v = 2\pi r/T$. إنّ زمن الدورة الواحدة T بالثواني هو: $T = (27.3\,\text{d})(24.0\,\text{h/d})(3600\,\text{s/h}) = 2.36 \times 10^6\,\text{s}$

وعليه:

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(2\pi r)^2}{T^2 r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{4\pi^2(3.84 \times 10^8\,\text{m})}{(2.36 \times 10^6\,\text{s})^2}$$
$$= 0.00272\,\text{m/s}^2 = 2.72 \times 10^{-3}\,\text{m/s}^2$$

ونستطيع إعادة التعبير عن هذا التسارع بدلالة مضاعفات عجلة الجاذبية الأرضية بالقرب من سطح الأرض $g = 9.80\,\text{m/s}^2$:

$$a = 2.72 \times 10^{-3}\,\text{m/s}^2\left(\frac{g}{9.80\,\text{m/s}^2}\right) = 2.78 \times 10^{-4}\,g$$

ملحوظة: لا يمكن عدّ التسارع المركزي للقمر، $a = 2.78 \times 10^{-4}\,g$ ناتجًا من جاذبية القمر للأجسام. ولكنه ناتج من جاذبية الأرض للأجسام، كالقمر الذي يبتعد عن سطح الأرض مسافة 384,000 km. وعليه، يجب ملاحظة صغر قيمة هذا التسارع مقارنة بتسارع الأجسام بالقرب من سطح الأرض.

تنويه:
ميّز جاذبية القمر للأجسام على سطحه، من جاذبية الأرض المؤثّرة في القمر (المثال الحالي).

2-5 ديناميكا الحركة الدّائريّة المنتظمة

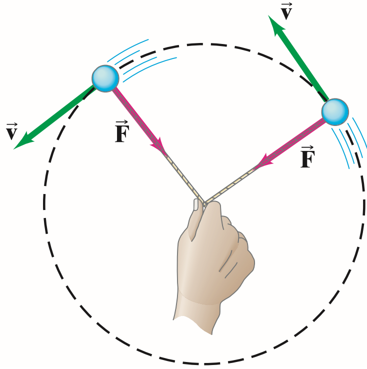
ضرورة وجود قوة لتحفيز التسارع المركزيّ

بناءً على قانون نيوتن الثاني ($\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$)، هناك قوة محصلة تؤثر في الجسم المُسرّع. وعليه، فإنّ الجسم الذي يتحرك دائريًّا، مثل الكرة المثبتة بطرف حبل، يتأثر بقوة محصلة تبقي على حركته الدائرية. أي أنّ هذه القوة هي المسؤولة عن كلّ من تسارعه المركزي وحركته الدائرية. ويمكن حساب هذه القوة باستخدام قانون نيوتن الثاني باتّجاه موازٍ لنصف القطر، $\Sigma F_R = ma_R$، حيث إن a_R هي تسارع الجسم المركزي و $a_R = v^2/r$ و ΣF_R هي القوة المحصلة المشيرة باتّجاه نصف القطر:

$$\Sigma F_R = ma_R = m\frac{v^2}{r} \qquad \text{[الحركة الدائرية]} \qquad (3-5)$$

تساوي v خلال الحركة الدائرية المنتظمة مقدارًا ثابتًا، وتمثل a_R التسارع الذي يشير عند كلّ لحظة إلى مركز الدائرة. لذا، فإنّ محصلة القوى -هي الأخرى- تشير باتّجاه مركز الدائرة (الشكل 5 – 4).

ويُعدّ وجود محصلة للقوى شيئًا ضروريًّا. ولهذا، فإنّ غياب هذه المحصلة المؤثرة في الجسم يجعل من غير الممكن إرغام الجسم على اتخاذ مسارٍ دائريٍّ بدلًا من مساره الأصلي في خطٍّ مستقيم، كما يخبرنا بذلك قانون نيوتن الأول. ومن أجل الحصول على حركة دائرية، يجب أن يتغيراتّجاه محصلة القوة باستمرار ليشير إلى مركز الدائرة عند كلّ لحظة. وتُسمّى هذه القوة أحيانًا بالقوة المركزية ("المشيرة باتّجاه المركز أو الباحثة عن المركز"). وتجدر الإشارة هنا إلى عدم اعتبار هذه القوة المركزية قوّةً جديدةً. علمًا بأنّ التسمية جاءت هنا لتصف اتّجاه محصلة القوى الضرورية للمسار الدائري. وبناءً على ذلك، فإنّ اتّجاه محصلة القوى المؤثرة في الجسم المعني من الأجسام الأخرى سيشير إلى مركز الدائرة. وعلى سبيل المثال، فمن أجل تحريك كرة مثبتة بطرف حبل في حركة دائرية؛ يجب أن يتم جذب الحبل ليؤثر الحبل بعد ذلك في الكرة (جرّب ذلك بنفسك).

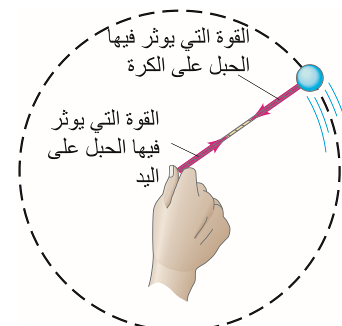


الشكل 5 – 4 وجود القوة ضروري لإبقاء الجسم متحرّكًا في مسار دائريّ. فإذا كانت السرعة ثابتة، فإنّ اتجاه القوة سيشير إلى مركز الدائرة.

تنويه:
لا تعد القوة المركزية نوعاً جديداً من القوة (فأية قوة يجب أن تؤثر في جسم ما).

تنويه:

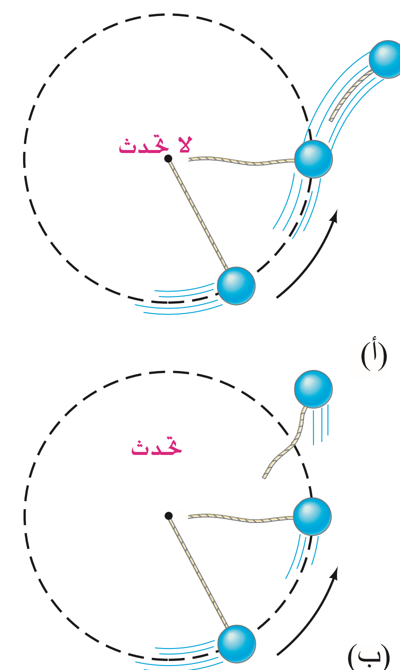
ليست هناك "قوة نابذة" حقيقية



الشكل 5 – 5 التلويح بكرة مثبتة بنهاية حبل.

هناك مفهوم خطأ مفاده أنّ الجسم الذي يتحرك على محيط دائرة يتأثر بقوة طاردة مركزية تسمى القوةَ النابذة (الطاردة) والسبب هو عدم وجود أيّ قوة نابذة (طاردة) تؤثر في الجسم الدوّار. فلنأخذ على سبيل المثال فتاة تلوّح بكرة مثبتة بنهاية حبل حول رأسها (الشكل 5 – 5). وإذا قمت بهذا العمل من قبل، فمن المحتمل أن تكون قد شعرت بقوة سحبٍ على يدك إلى الخارج. إنّ منشأ المفهوم الخطأ للقوة النابذة (الطاردة) يظهر القوة النابذة (الطاردة) الساحبة للكرة إلى الخارج وكأنها انتقلت خلال الحبل إلى اليد. ولكن ليس هذا ما يحدث إطلاقا؛ فمن أجل بقاء حركة الكرة دائرية، يجب أن يتم سحب الحبل إلى الداخل ليؤثر الحبل بهذه القوة في الكرة. وعليه، فإنّ الكرة ستؤثر في الحبل بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه حسب قانون نيوتن الثالث، وهي ردّ الفعل الذي ستشعر اليد به (انظر الشكل 5 – 5).

إنّ القوة على الكرة هي تلك التي يؤثر بها الشخص في الكرة إلى الداخل من خلال الحبل. ولكي ترى دليلًا أكثر إقناعًا على عدم تأثير القوة النابذة على الكرة، لاحظ ما يحدث للكرة عند إفلات الحبل . ستحلق الكرة مبتعدة في حال وجود قوة نابذة مؤثرة كما هو موضح في (الشكل 5 – 6 أ). ولكن ليس هذا ما يحدث إطلاقًا؛ لأنّ الكرة سوف تبتعد باتجاه موازٍ تمامًا لمماس الدائرة (الشكل 5 – 6 ب). وهو اتجاه السرعة المتجهة نفسه لحظة تحرير الكرة نتيجة توقف عمل القوة المتجهة المشيرة إلى الداخل. جرّب ذلك لتشاهد ما سيحدث!





الشكل 5 – 6 إذا وجدت القوة الطاردة المؤثرة، فإنّ الكرة الدوارة ستحلق مبتعدة إلى الخارج كما في (أ) عندما يتم إفلاتها. وفي الحقيقة، ستطير الكرة مماسيا كما في (ب) . وعلى سبيل المثال، كما في (جـ) فإنّ الشرارة ستطير في خطوط مستقيمة بالاتجاه المماس لحافة عجل الشحذ الدّوّار.

المثال 5-3 قدّر القوة المؤثّرة في كرة تتحرّك في دائرة أفقيًا

قدّر قيمة القوة الواجب أن يؤثر بها شخص ما في حبل مثبت بطرفه الآخر كرة كتلتها 0.150 kg لكي تمسح الكرة دائرة أفقية نصف قطرها 0.600 m. علمًا بأنّ الكرة تدور دورتين كاملتين خلال الثانية الواحدة ($T = 0.500\,\text{s}$). كما في (المثال 5 – 1).

النّهج: يجب أن نرسم مخطط الجسم الحر للكرة حيث إنّ القوى المؤثرة في الكرة هي قوة الجاذبية $m\vec{\mathbf{g}}$ إلى أسفل. وقوة الشّدّ $\vec{\mathbf{F}}_{\text{T}}$ التي يؤثر بها الحبل باتجاه اليد نحو المركز (التي تنتج بسبب تأثير الشخص بالقوة نفسها في الحبل). ويظهر مخطط الجسم الحرّ للكرة في (الشكل 5 – 7). ويُعدّ وزن الكرة من الأمور التي تزيد المسألة تعقيدًا لتجعل من الاستحالة دوران الكرة والحبل ممتدًا أفقيًّا بطريقة مثالية . ومن أجل تسهيل هذا؛ نفترض أنّ وزن الكرة صغير. ونضع $\phi \approx 0$ في (الشكل 5 – 7). ونتيجة لذلك. فإنّ $\vec{\mathbf{F}}_{\text{T}}$ ستؤثر باتجاه قريب جدًّا من الأفقي لتوفر القوة اللازمة لتمنح الكرة تسارعها المركزي.

الحــلّ: سنطبق قانون نيوتن الثاني في الاتجاه القطري:

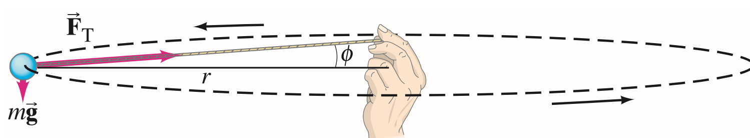
$$(\Sigma F)_{\text{R}} = ma_{\text{R}}$$

حيث إن $a_{\text{R}} = v^2/r$ و $v = 2\pi r/T = 2\pi(0.600\,\text{m})/(0.500\,\text{s}) = 7.54\,\text{m/s}$. وعليه، فإنّ

$$F_{\text{T}} = m\frac{v^2}{r} = (0.150\,\text{kg})\frac{(7.54\,\text{m/s})^2}{(0.600\,\text{m})} \approx 14\,\text{N}$$

ملحوظة: إن سبب إبقائنا على رقمين مميزين في الحل النهائي بعد أن أهملنا تأثير mg هو أنّ $mg = (0.150\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2) = 1.5\,\text{N}$، وهو رقم صغير يعادل $\frac{1}{10}$ من حلنا أعلاه تقريبا. ومع هذا، فهو لا يُعدّ صغيرا جدًا لدرجة نحتاج عندها إلى إجابة أكثر دقة.

ملحوظة: يجب أن نحلل $\vec{\mathbf{F}}_{\text{T}}$ في (الشكل 5 – 7) إلى مركبتها. وجعل مركبة $\vec{\mathbf{F}}_{\text{T}}$ الأفقية تعادل mv^2/r والمركبة العمودية تعادل mg، وهذا فقط من أجل إضافة تأثير $m\vec{\mathbf{g}}$.



الشكل 5 – 7. (المثال 5 - 3)

المثال 5-4 كرة تتحرك في دائرة (رأسيًا)

لوّحت كرة كتلتها $0.15\ kg$، وتتدلى من نهاية حبل طوله 1.10-m (مهمل الكتلة)، في دائرة رأسية .

(أ) حدد السرعة الدنيا اللازم توافرها عند أعلى القوس لكي تبقى الكرة مستمرة في حركتها الدائرية.

(ب) احسب قيمة الشد في الحبل عند أسفل القوس على افتراض أنّ الكرة تتحرك بضعف سرعتها مقارنة مع الفرع السابق (أ).

النهج: ستتحرك الكرة في دائرة رأسية ولن تخضع للحركة الدائرية المنتظمة. ويعود السبب في ذلك إلى تغير مقدار سرعة الكرة بسبب الجاذبية مع بقاء نصف قطر المسار ثابتا. ومع ذلك، فإنّ (المعادلة 5 – 1) لا تزال تُعدّ صحيحة وقابلة للتطبيق عند كلّ نقطة خلال المسار الدائري. وعليه، سنستخدمها عند كلّ من الموضعين 1 و 2. انظر إلى مخطط الجسم الحر الموضح في (الشكل 5 – 8) لكلا الموضعين 1 و 2.

الحــل: (أ) تخضع الكرة لقوتين عند القمة (عند أعلى موضع في المسار، نقطة 1) وهما قوة الجاذبية، $m\vec{g}$ وقوة شد الحبل عند النقطة 1، $\vec{F}_{T1}$. ويؤثر كلاهما إلى أسفل، حيث تعمل محصلتهما المتجهة على تزويد الكرة بتسارع مركزي a_R. ونطبق قانون نيوتن الثاني بالاتجاه الرأسي، ونختار الاتجاه الموجب إلى أسفل مع اتجاه التسارع (باتجاه المركز): $(\Sigma F)_R = ma_R$

$$F_{T1} + mg = m\frac{v_1^2}{r} \qquad \text{[عند القمة]}$$

ونستطيع أن نرى من هذه المعادلة أنّ قوة الشّدّ F_{T1} عند النقطة 1 تزداد كما كان متوقعا كلما ازدادت v_1(سرعة الكرة عند قمة الدائرة). ولكن التساؤل كان ولا يزال قائمًا عن قيمة السرعة الدنيا الكافية لإبقاء الكرة في مسارها الدائري، علمًا بأنّ الحبل سيبقى مشدودًا طالما ظلّت قوّة الشدّ تؤثّر فيه. أمّا عند اختفاء الشدّ (بسبب صغر قيمة v_1)، فإنّ ذلك سيؤدّي إلى ارتخاء الحبل ممّا قد يتسبب بسقوط الكرة خارج مدارها الدائري. لذا، فإنّ السرعة الدنيا ستتحقق عندما تكون $F_{T1} = 0$، وعندها ستصبح:

$$mg = m\frac{v_1^2}{r} \qquad \text{[السرعة الدنيا عند القمة]}$$

ونحلّ لإيجاد v_1:

$$v_1 = \sqrt{gr} = \sqrt{(9.80\ \text{m/s}^2)(1.10\ \text{m})} = 3.28\ \text{m/s}$$

وتمثل هذه السرعة أقلّ قيمة يجب أن تصلها الكرة عند أعلى نقطة في المسار لكي تستمر في مدارها الدائريّ.

(ب) وعندما تقترب الكرة من أخفض نقطة في المسار الدائري (نقطة 2 في الشكل 5 – 8)، يصبح اتجاه الشد في الحبل F_{T2} إلى الأعلى، في حين يبقى اتجاه قوة جذب الأرض $m\vec{g}$ إلى الأسفل. وعند تطبيقنا لقانون نيوتن الثاني مفترضين أنّ الاتجاه الموجب إلى الأعلى هو اتجاه تسارع الكرة (اتجاه مركز الدائرة) فسنحصل على ما يلي:

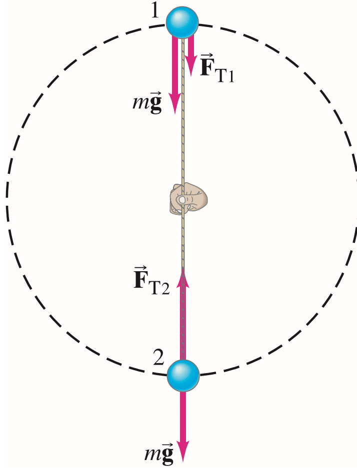
$$(\Sigma F)_R = ma_R$$

$$F_{T2} - mg = m\frac{v_2^2}{r} \qquad \text{[عند القاع]}$$

وبتعويض قيمة السرعة، v_2، بضعف ما كانت عليه في الفرع أ، أي $6.56\ m/s$، نحصل على قيمة F_{T2}:

$$F_{T2} = m\frac{v_2^2}{r} + mg$$

$$= (0.150\ \text{kg})\frac{(6.56\ \text{m/s})^2}{(1.10\ \text{m})} + (0.150\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 7.34\ \text{N}$$



الشكل 5 – 8 (المثال 5 - 4).
مخطط جسم حرّ للموضعين 1 و 2.

يزود الشد في الحبل والجاذبية معا بتسارع مركزي.

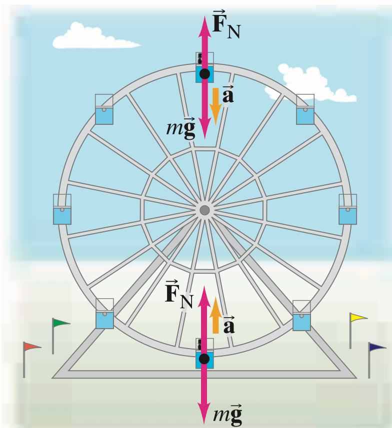
تولد الجاذبية تسارع نحو المركز.

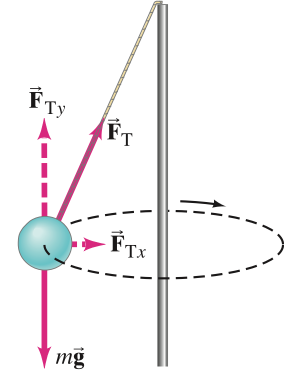
يؤدي الشد في الحبل والجاذبية المؤثران في اتجاهين متعاكسين إلى تسارع مركزي

التمرين ب: عند مراقبة آلة تجفيف ثياب تعمل بطريقة الدوران، وُجد أنّ الثياب تسقط إلى الأسفل داخل الآلة لحظة وصولها إلى أعلى نقطة في مسارها الدائري، وذلك بدلًا من بقائها على السطح الداخلي للأسطوانة، وهي تمسح دورات كاملة خلال فترات طويلة. حدّد ما إذا كانت سرعة دوران الأسطوانة الداخلية لآلة تجفيف الثياب ستزداد أم ستنقص نتيجة لثقل الثياب أو خفتها.

التمرين جـ: يتحرك راكب عجلة "فيريس" (Ferris) في دائرة رأسية نصف قطرها r، وبسرعة ثابتة مقدارها v عند أعلى نقطة (الشكل 5 – 9). هل تكون القوة الرأسية التي يؤثر بها المقعد في الراكب عند أعلى نقطة (أ) أقلّ من القوة التي يؤثر بها المقعد في الراكب عند أخفض نقطة في مدار العجلة؟ أم (ب) أكبر منها؟ أم (جـ) تساويها؟

الشكل 5 – 9 التمرين جـ





الشكل 5 – 10 (المثال 5 – 5).

المثال المفاهيمي 5-5 الكرة المطولة (Tetherball)

كرة مربوطة بحبل مثبت من طرفه الآخر بوتد. تدور الكرة حول الوتد دورات كاملة كما هو موضح في (الشكل 5 – 10). حدّد كلًّا من اتجاه تسارع الكرة والقوة المسببة لهذا التسارع؟

الإجابة: عندما تمسح الكرة دوائر أفقية خلال حركتها كما هو مبين. سيشير اتجاه تسارعها إلى مركز الدائرة (أي ليس على امتداد الوتد). وقد لا تكون القوة المسببة لهذا التسارع المركزي ظاهرة لوهلة؛ وذلك لعدم وجود قوة تشير مباشرة إلى الاتجاه الأفقي. ومع هذا، فإنّ محصلة القوى. (في هذا المثال هي الجمع المتجه لكلّ من $\vec{F}_T$ و $m\vec{g}$)، هي التي يجب أن تشير باتجاه التسارع؛ لأنّ المركبة الرأسية للشّدّ في الحبل F_{Ty}، ستعادل وزن الكرة، $m\vec{g}$ أما المركبة الأفقية للشّدّ، F_{Tx}، فهي المسؤولة عن وجود التسارع المركزي.

طريقة حلّ المسائل: الحركة الدائرية المنتظمة

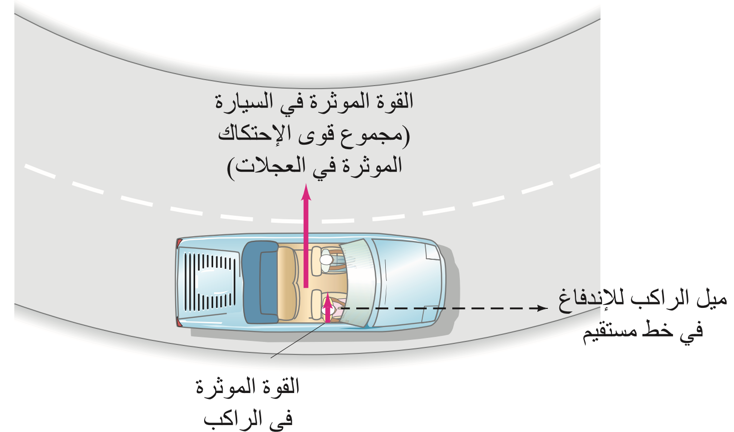
1. **ارسم مخطط الجسم الحرّ** مظهرًا القوى المؤثرة جميعها في الأجسام موضع الدراسة. وكن متأكّدًا من تحديد مصدر كلّ قوة (الشد في الحبل، وقوة الجاذبية الأرضية، والاحتكاك، والقوة الرأسية ....إلخ). ولا تضع أيّ معلومة غير مفيدة (مثل القوة النابذة).
2. **حدّد** أيًّا من هذه القوى أو مركباتها التي تُسبب التسارع المركزي، التي تعمل قطريًّا باتجاه مركز المسار الدائري أو بعكس اتجاهه . إن **مجموع هذه القوى (أو مركباتها)** يسبب تسارعا مركزيًّا يعطى بالعلاقة: $a_R = v^2/r$.
3. **اختر نظام إحداثيات مناسب** حيث من الأفضل أن يتم اختيار أحد محاور النظام موازيًا لاتجاه التسارع.
4. **طبّق قانون نيوتن الثاني للمركبة القطرية:**

$$(\Sigma F)_R = ma_R = m\frac{v^2}{r}. \quad \text{[الاتجاه القطري]}$$

5-3 منعطفات الطريق السريع المائلة وغير المائلة

تطبيق الفيزياء
القيادة حول منعطف

سنتناول الآن مثالا على الحركة الدائرية عندما تنعطف السيارة على أي منعطف، ولننقل إلى اليسار. وفي هذه الحالة تحديدًا؛ أي عندما ينعطف السائق يسارًا، فسيشعر وكأنه يُدفع إلى الخارج من موضعه باتجاه باب السيارة الأيمن. ومع هذا، فليس هناك أيّ وجود لمثل هذه القوى النابذة كي تعمل على دفعه إلى الخارج. وحقيقة ما يحدث هنا، أنه عندما تبدأ السيارة بدخول المنعطف ذي المسارالدائريّ، يكون جسم السائق لا يزال متأثّرًا بالحركة الانتقالية باتجاهٍ موازٍ للسرعة المتجهة. ولكي يتبع السائق سيارته في مسارها الدائري، يبدأ المقعد (عن طريق الاحتكاك). أو باب السيارة (عن طريق الاتصال المباشر) بالتأثير بقوة في جسم السائق (الشكل 5 – 11). ويجب ألا ننسى هنا أنّ السيارة تتأثر بقوّة أيضًا لتجبرها على تتّبع المسار الدائريّ. وتوفر قوة الاحتكاك بين عجلات السيارة وسطح الطريق هذه القوة عندما يكون سطح الطريق أفقيّا.



الشكل 5 – 11 يؤثر الطريق بقوة إلى الداخل في السيارة (الاحتكاك المؤثر في العجلات) فيرغمها على اتباع مسار دائريّ. ومن ثَمَّ تؤثر السيارة بقوة إلى الداخل في الراكب.

وستكون القوة التي يؤثر بها الطريق في العجلات هي قوة الاحتكاك السّكونيّ في حالة دوران عجلات السيارة على الأرض على نحو طبيعي من غير انزلاق أو انزياح ليُلامس أسفلها سطح الطريق عند كلّ لحظة. وإذا كانت قيمة الاحتكاك صغيرة أو غير كبيرة بما فيها الكفاية كما يحدث في أيام الصقيع، فلن تستطيع قوة الاحتكاك هذه إبقاء السيارة في مدارها الدائريّ لتستمر في حركتها بخط مستقيم. انظر (الشكل 5 – 12). وفي اللحظة التي تبدأ عندها السيارة بالانزلاق أو الانزياح، تتبدل قوة الاحتكاك السكونية لتصبح قوة احتكاك حركية، وتكون أقلّ من قوة الاحتكاك السّكونيّ.



الشكل 5 – 12 سيارة سباق تسير باتجاه منعطف. ونرى من آثار العجلات أنّ معظم السيارات قد حصلت على قوة احتكاك كافية لتزويدها بتسارع مركزي للدوران مع المنعطف بأمان، وكذلك، نرى أيضا آثار عجلات تظهر قوة غير كافية على السيارات – التي اتبعت بناءً على ذلك مسارات تكاد تكون مستقيمة.

المثال 6-5 الانزلاق عن المنعطف

هل ستنزلق سيارة كتلتها 1000-kg تسير على طريق أفقي عندما تلف حول منعطفٍ نصف قطره 50 m بسرعة مقدارها 50 km/h (14 m/s) أم لا؟ افرض أنّ: (أ) سطح الطريق جاف ومعامل الاحتكاك السّكونيّ $\mu_s = 0.60$. (ب) سطح الطريق مغطى بطبقة من الصقيع ومعامل الاحتكاك السّكونيّ $\mu_s = 0.25$.

النهج: إن القوى المؤثرة في السيارة هي قوة الجاذبية، mg التي تشير إلى الأسفل، والقوة الرأسية F_N التي تشير إلى الأعلى التي يؤثر بها الطريق في السيارة، وقوة الاحتكاك الأفقية الناجّة من الطريق. ويوضح (الشكل 5 – 13) مخطط الجسم الحرّ للسيارة حيث ستتبع السيارة المنعطف عندما تكون قوة الاحتكاك العظمى أكبر من حاصل ضرب كتلة السيارة في التسارع المركزي.

الحــل: ليس هناك أيّ تسارع للسيارة في الاتجاه الرأسي. ويظهر قانون نيوتن الثاني أنّ القوة الرأسية F_N على السّيارة إلى الأعلى تعادل وزن السيارة إلى الأسفل، علمًا بأنّ الطريق أفقيّ تمامًا:

$$F_N = mg = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 9800\,\text{N}$$

وبما أنّ القوة الوحيدة في الاتجاه الأفقي هي قوة الاحتكاك، فيجب أن تتم مقارنتها مع القوّة اللازمة لإنتاج التسارع المركزي للحكم على ما إذا كانت كافية لذلك أم لا. إنّ محصّلة القوى الأفقية اللازمة لإبقاء السيارة تتحرك في مسار دائريّ حول المنعطف هي:

$$(\Sigma F)_R = ma_R = m\frac{v^2}{r} = (1000\,\text{kg})\frac{(14\,\text{m/s})^2}{(50\,\text{m})} = 3900\,\text{N}$$

ويجب حساب قوة الاحتكاك الكلية العظمى (وهي مجموع قوى الاحتكاك الناجّة من العجلات الأربع) لتحديد ما إذا كانت كبيرة لدرجة كافية لتوفير تسارع مركزي آمن (ونتذكّر من البند 4 – 8 أنّ $F_{fr} \le \mu_s F_N$) وعليه:

(أ) فإنّ أعلى قيمة ممكنة للاحتكاك السّكونيّ عندما تكون $\mu_s = 0.60$ هي:

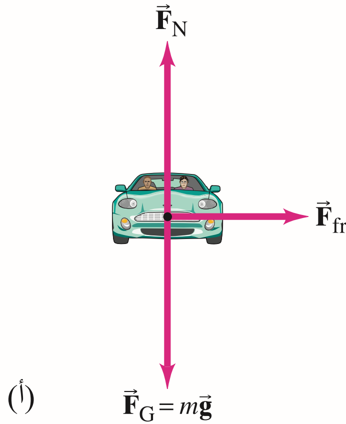
$$(F_{fr})_{max} = \mu_s F_N = (0.60)(9800\,\text{N}) = 5900\,\text{N}$$

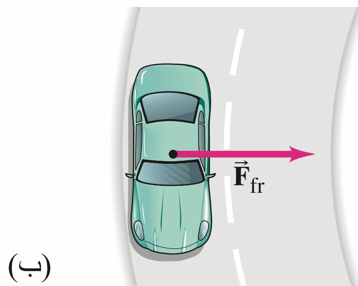
وبما أنّ القوّة الأفقية اللازمة لإبقاء السيارة تتحرك في مسار دائري حول المنعطف هي 3900 N وهو ما سيؤثر به الطريق من قوة احتكاك في السيارة، فإنّ السيارة ستتبع المنعطف بالطبع.

ولكن بالنسبة إلى الفرع الثاني (ب)، فإنّ القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السّكونيّ الممكنة، هي:

$$(F_{fr})_{max} = \mu_s F_N = (0.25)(9800\,\text{N}) = 2500\,\text{N}$$

وعليه، فإنّ السيارة ستبدأ الإنزلاق؛ لأنّ الطريق لن تكون قادرة على التأثير بقوة احتكاك كافية، علما بأنّ المطلوب هو تأمين 3900 N لإبقاء السيارة تتحرك على الطريق بسرعة 50 km/h من غير أن تنزلق خلال المنعطف الذي يساوي نصفُ قطره 50 m.





الشكل 5 – 13 (المثال 5 – 6). القوى المؤثرة في سيارة تلف منعطفا على طريق أفقي. (أ) منظر أماميّ. (ب) منظر عُلويّ.

وكذلك هناك احتمال كبير جدًّا لانزلاق السيارة عن الطريق، خاصة في حالة انغلاق العجلات وتوقفها عن الدوران نتيجة لضغط كوابح السيارة بشدة، علمًا بأنّ قوة الاحتكاك السّكونيّ لا تظهر إلا عندما تدور عجلات السيارة على الطريق دورانًا صحيحًا، وعندما تنغلق العجلات وتتوقف عن الدوران، فإنّ السيارة ستبدأ بالانزلاق على سطح الطريق لتصبح قيمة الاحتكاك أقلّ ممّا كانت عليه قبل ذلك؛ وهذا ما يميّز عادةً قوّة الاحتكاك الحركي، وما يترتب على ذلك هو التغير الفجائي على اتجاه قوة الاحتكاك عند انغلاق العجلات، وتشير قوة الاحتكاك السّكونيّ باتجاه رأسي بالنسبة إلى اتجاه السرعة، كما هو مبين في (الشكل 5 – 13 ب). وعندما تبدأ السيارة بالانزلاق، فإنّ اتجاه قوة الاحتكاك الحركي سيشير إلى عكس اتجاه السرعة المتجهة، وعليه، فإنّ القوة لن تشير إلى مركز الدائرة كما في (الشكل 5 – 12). والأسوأ من ذلك عندما يكون سطح الطريق مبللًا أو مغطّى بطبقةٍ رقيقةٍ مصقولةٍ من الصقيع، فإنّ انغلاق الدواليب سينتج مع أقل جهد قد يبذل على الكوابح نظرًا لصغر قيمة قوة الاحتكاك الناجّة من سطح الطريق، ونتيجة لما سبق ذكره جميعه، فقد تم تصميم مانع انغلاق الكوابح (ABS) للتقليل من الضغط على الكوابح والتحكم بها مباشرةً قبل حدوث الانزلاق بمساعدة حسّاسات دقيقة وحاسوب سريع.

تطبيق الفيزياء
مانع انغلاق الكوابح

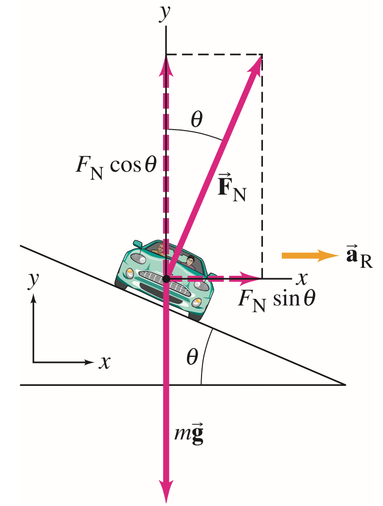
إن تصميم منعطفات تميل بزوايا معينة يساعد على تقليل احتمال الانزلاق؛ حيث من الممكن للقوة الرأسية الناتجة من الطريق المائل والمؤثرة باتجاه رأسي في الطريق أن يكون لها مركبة تشير إلى مركز الدائرة، لتساعد على التقليل من الاعتماد على الاحتكاك، كما في (الشكل 5 – 14). وهناك سرعة وحيدة لكلّ زاوية ميل θ لا تحتاج السيارة عندها إلى قوة احتكاك. وهي الحالة التي تكون عندها المركبة الأفقية $F_N \sin\theta$ للقوة العمودية تشير باتجاه مركز المنعطف. وتعادل القوة اللازمة لإعطاء السيارة تسارعًا مركزيًّا (انظر شكل 5 – 14):

$$F_N \sin\theta = m\frac{v^2}{r} \qquad \text{[الاحتكاك غير ضروريّ]}$$

وعادة ما يتم اختيار زاوية ميل الطريق θ بحيث تتوافر الظروف لسرعة معينة تسمى "سرعة التصميم".

تطبيق الفيزياء

المنعطفات المائلة



الشكل 5 – 14 مركبتا القوة العمودية (الرأسية والأفقية) المؤثرتان في سيارة تسير حول منعطف مائل. التسارع المركزي أفقي (وغير موازٍ للطريق المائل). ويمكن لقوة الاحتكاك (غير الظاهرة) أن تشير إلى الأعلى أو الأسفل على امتداد الميل اعتمادا على سرعة السيارة. وستؤول قوة الاحتكاك إلى الصفر عند سرعة معينة.

المثال 5-7 منعطف بزاوية ميل

(أ) حدّد صيغة لزاوية ميل طريق بحيث تنعدم الحاجة عندها إلى قوة الاحتكاك لسيارة تتحرك بسرعة v حول منعطف نصف قطره r. (ب) احسب زاوية ميل مخرج طريق سريع على شكل منعطف نصف قطره 50 m تم تصميمه لقيادة الحافلات بأمان عند سرعة 50 km/h.

النهج: بالرغم من أنّ المخرج مائل، فإنّ السيارة لا تزال تتحرك من خلال دائرة أفقية. وعليه، فإنّ التسارع المركزيّ يجب أن يبقى أفقيًّا. ولذلك يجب أن يتمّ اختيار نظام إحداثيات بحيث يكون أحد المحاور أفقيًّا والمحور الآخر رأسيًّا، لتكون a_R منطبقة على المحور الأفقي تمامًا. إنّ القوى التي على السيارة هي قوة الجاذبية الأرضية إلى الأسفل mg، والقوة العمودية F_N التي تؤثر بها الطريق في السيارة واتجاهها يصنع زاوية قائمة مع سطح الطريق. انظر (الشكل 5 – 14) حيث تظهر مركبتا F_N أيضًا. ولن نحتاج إلى التعامل مع قوة الاحتكاك هنا، نظرًا إلى تصميم الطريق بحيث يمكن الاستغناء عنها.

الحـل: (أ) تعطي $\Sigma F_R = ma_R$ في الاتجاه الأفقي:

$$F_N \sin\theta = \frac{mv^2}{r}$$

وبما أنه لا توجد حركة في الاتجاه الرأسي، فإنّ مركبة التسارع الرأسية تساوي صفرًا. لذا، فإنّ $\Sigma F_y = ma_y$ تعطي:

$$F_N \cos\theta - mg = 0$$

أي

$$F_N = \frac{mg}{\cos\theta}$$

[لاحظ في هذه الحالة أنّ $F_N \geq mg$ لأنّ $\cos\theta \leq 1$]

ونعوض هذه العلاقة في F_N في المعادلة في الاتجاه الأفقي:

لنحصل على

$$F_N \sin\theta = m\frac{v^2}{r}$$

أو:

$$\frac{mg}{\cos\theta}\sin\theta = m\frac{v^2}{r}$$

لذلك فإن

$$mg\tan\theta = m\frac{v^2}{r}$$

$$\tan\theta = \frac{v^2}{rg}$$

وهذه هي الصيغة لزاوية الميل θ حيث إنه لا حاجة إلى الاحتكاك عند السرعة v.

(ب) وعندما $r = 50$ m و $v = 50$ km/s (14 m/s)

$$\tan\theta = \frac{(14\,\text{m/s})^2}{(50\,\text{m})(9.8\,\text{m/s}^2)} = 0.40$$

لذلك $\theta = 22°$

تنويه: F_N لا تعادل mg دائما.

تعمل المركبة الأفقية للقوة العمودية على توليد تسارع مركزي (ويجب أن يكون الاحتكاك منعدما – وإلا فإنه سيساعد في توليد التسارع المركزي أيضا).

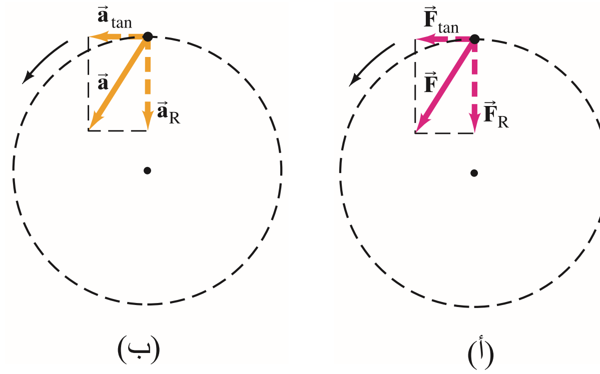
زاوية الميل (لا حاجة إلى الاحتكاك)

تمرين د: وضع سائق أكياسًا من الرمل داخل سيارته رغبةً منه برفع قيمة قوّة الاحتكاك بين عجلات سيارته والطريق لكي يتمكّن من دخول المنعطف بسرعة مرتفعة. هل ستساعد هذه الأكياس على ذلك؟

التمرين هـ: هل يمكن لسيارة صغيرة وشاحنة ثقيلة أن تقطعا المنعطف المائل نفسه بالسرعة والأمان ذاتيهما؟

* 4-5 الحركة الدائرية غير المنتظمة

عندما يتحرك جسم ما بسرعة ثابتة على محيط دائرة لتشير محصّلة القوى المؤثرة فيه إلى مركز هذه الدائرة، فإنّ هذا الجسم سيخضع إلى حركة دائرية بالطبع. وأما إذا كانت محصلة القوى المؤثرة فيه تصنع زاوية ما مع المحور الرئيس ولا تشير إلى مركز الدائرة، كما هو مبين في (الشكل 5 – 15 أ)، فسيكون بالإمكان تحليل هذه القوة إلى مركبتين؛ الأولى تشير باتجاه مركز الدائرة F_R وتحفز التسارع المركزي a_R ، وتحافظ على حركة الجسم الدائرية. والمركبة الأخرى مُماسّة للدائرة F_{tan} تعمل على زيادة السرعة أو نقصانها؛ أي أنّها تعمل على إيجاد مركبة تسارع مُماسّة للدائرة a_{tan}. وتبدأ مركبة القوة المُماسّة بالعمل عندما تتغير سرعة الجسم.



الشكل 5 – 15 تتغير سرعة جسم يتحرك حول محيط دائرة عندما تمتلك القوة المؤثرة فيه مركبة مُماسّة F_{tan}. يظهر الفرع (أ) القوة $\vec{\mathbf{F}}$ ومركبتيها المتجهتين. ويظهر الفرع (ب) متجه التسارع ومركبتيه المتجهتين.

لقد أكسبت الكرة المثبتة بنهاية الحبل تسارعًا مُماسًّا عندما بدأت بتحريكها حول رأسك في حركة دائرية . وكان ذلك نتيجة لسحب الحبل باليد وهي في موضع بعيد عن مركز الدائرة. وفي الرياضة، يسرّع رامي الجُلّة مُماسًّا بطريقة مماثلة للوصف السابق لتصل إلى سرعة عالية قبل أن يتركها.

المركبة المماسّة للتسارع a_{tan} هي معدل تغير قيمة السرعة المتجهة للجسم. ويعبر عن ذلك كما يلي:

$$a_{tan} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

وينشأ التسارع القطري (المركزي) نتيجة تغير اتجاه السرعة المتجهة. وكما رأينا في (المعادلة 5 – 1) فهو كالتالي:

$$a_R = \frac{v^2}{r}$$

ويشير التسارع المُماس إلى اتجاه الحركة الموازي لـ $\vec{\mathbf{v}}$ نفسه عندما تكون السرعة متزايدة وهو مُماسٌّ للدائرة، كما هو مبين في (الشكل 5 – 15 ب). أما إذا كانت السرعة متناقصة، فإنّ $\vec{\mathbf{a}}_{tan}$ سيشير بالاتجاه الموازي والمعاكس لاتجاه $\vec{\mathbf{v}}$. وفي الحالتين السابقتين، فإنّ $\vec{\mathbf{a}}_{tan}$ و $\vec{\mathbf{a}}_R$ يكونان متعامدين على بعضهما ليتغير اتجاههما باستمرار كلما تحرك الجسم في مداره الدائريّ. وعليه، فإنّ محصلة التسارع المتجه $\vec{\mathbf{a}}$ ستعادل مجموع هاتين المركبتين حسب المعادلة التالية:

$$\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{a}}_{tan} + \vec{\mathbf{a}}_R$$

وبما أنّ مركبتي التسارع $\vec{\mathbf{a}}_R$ و $\vec{\mathbf{a}}_{tan}$ تكونان دائمًا متعامدتين على بعضهما بعضًا، فإنَّ قيمة $\vec{\mathbf{a}}$ عند أيّ لحظة هي:

$$a = \sqrt{a_{tan}^2 + a_R^2}$$

المثال 8-5 مركبتا التّسارع

تبدأ سيارة سباق بالحركة من وضع السّكون، وتتسارع على نحو منتظم في مسار دائري نصف قطره 500 m لتصل سرعتها إلى 35 m/s خلال 11 s. إذا افترضت أنّ التسارع المماس ثابت، فأوجد: (أ) التسارعَ المماسّ. (ب) التسارعَ القطريّ عند اللحظة التي تكون فيها السرعة تساوي $v = 15\,\text{m/s}$.

النّهج: يرتبط التسارع المماس بتغير السرعة المماسة للسيارة، ويمكن حسابه من المعادلة التالية: $a_{\tan} = \Delta v/\Delta t$. أمّا التسارع المركزي، فيرتبط بالتغير في اتجاه السرعة المتجهة، ويمكن حسابه باستخدام المعادلة الآتية: $a_R = v^2/r$.

الحـــلّ: (أ) سوف نفترض بأنّ التسارع المماس $a_{\tan}$ ثابت خلال فترة الإحدى عشرة ثانية، ونحسب قيمته كما يلي:

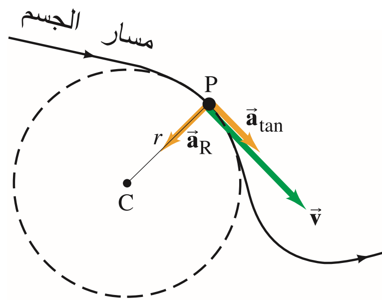
$$a_{\tan} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(35\,\text{m/s} - 0\,\text{m/s})}{11\,\text{s}} = 3.2\,\text{m/s}^2$$

(ب) وعند حساب التسارع المركزي عند $v = 15\,\text{m/s}$ نحصل على

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(15\,\text{m/s})^2}{(500\,\text{m})} = 0.45\,\text{m/s}^2$$

التمرين و: كيف تتغير قيمة كلّ من: (أ) $a_{\tan}$ و (ب) a_R عندما تساوي سرعة سيارة السباق في (المثال 5 – 8) 30m/s؟

يمكن استخدام هذه المبادئ لجسم يتحرك خلال مسار منحنٍ كما هو مبين في (الشكل 5 – 16)؛ حيث يمكننا التعامل مع أيّ جزءٍ من المنحنى وكأنه قوس في دائرة نصف قطرها r. إنّ السرعة المتجهة عند أيّ نقطة هي دائمًا مماسّة للمسار. ويمكن كتابة التسارع الكليّ على نحو عام كمجموع اتجاهي لمركبتين هما المركبة المماسة $a_{\tan} = \Delta v/\Delta t$ والمركبة القطرية (المركزية) $a_R = v^2/r$.



الشكل 5 – 16 جسم يتبع مسارًا منحنيًا (الخط المتصل). ويمتلك المسار عند النقطة P نصف قطر تكور r، وسرعة متجهة $\vec{\mathbf{v}}$، و تسارعًا مماسًا $\vec{\mathbf{a}}_{\tan}$ (حيث تزداد سرعة الجسم)، وتسارعًا مركزيًا (قطري) $\vec{\mathbf{a}}_R$ (قيمته $a_R = v^2/r$) ويشير إلى مركز التكور C.

5-5 الطّرد المركزيّ.

تطبيق الفيزياء
الطرد المركزي

تقدم أجهزة الطرد المركزي، وخصوصًا فائقة السرعة منها، أمثلةً رائعةً على الحركة الدائرية. وتستخدم هذه الأجهزة لترسيب مكونات المواد أو فصلها عن بعض. تُوضع أنابيب الاختبار في قرص جهاز الطرد المركزي الدوّار ليعمل على تسريعها وإيصالها إلى سرعات عالية جدًا. انظر (الشكل 5 – 17)؛ حيث يظهر أنبوب الاختبار في موضعين مختلفين خلال دوران القرص. وتمثل النقطة الخضراء الصغيرة جسمًا صغيرًا، ربما جزيئًا مجهريًا، في السائل المعبأ في أنبوب الاختبار. وعندما يكون الأنبوب في الموضع (أ) خلال دوران القرص، يميل الجسم إلى التحرك في خطٍّ مستقيمٍ موازٍ لاتجاه السهم المخطّط. ولكنّ السائل المانع لحركة هذه الأجسام يسبّب قوةً مركزيّةً تكاد ترغم الأجسام على التحرّك في مسارٍ دائريّ. وبما أنّ مقاومة الموائع (سواء كانت سائلة أو غازية أو هلامية) عادةً لا تعادل mv^2/r تمامًا ، فإنّ ذلك سيدفع الأجسام في نهاية الأمر إلى التحرك باتجاه قاع الأنبوب. وعليه، فإنّ الهدف الأساس من الطرد المركزي هو توفير "جاذبية فاعلة" ذات قيمة أعلى بكثيرٍ من قيمة الجاذبية الرأسية بسبب السرعات الدورانية العالية، مما يؤدّي إلى تسريع عملية الترسيب.

المثال 5-9 الطّرد المركزيّ فائق السّرعة

يدور قرص جهاز الطرد المركزي فائق السرعة بمعدل 50,000 دورة لكلّ دقيقة. فإذا علمت أنّ قمة أنبوب اختبار طوله 4.00 cm مثبت داخل القرص تبتعد مسافة 6.00 cm عن محور الدوران (كما هو موضح في الشكل 5 – 17). وأنّ قاعدة الأنبوب تبتعد مسافة 10.00 cm عن المحور. فاحسب مقدار التسارع المركزي بدلالة مضاعفات "g" عند قمة الأنبوب وقاعه.

النّهج: نحسب التسارع المركزي باستخدام المعادلة التالية: $a_R = v^2/r$. ومن ثَمّ نقسم على قيمة تسارع الجاذبية الأرضية $g = 9.80\ \mathrm{m/s^2}$ فنحصل على قيمة a_R بدلالة g.

الحـــلّ: عندما يتحرك الأنبوب في دائرة محيطها $2\pi r$، تصبح المسافة عند قمة الأنبوب كالتالي:

$$2\pi r = (2\pi)(0.0600\ \mathrm{m}) = 0.377\ \mathrm{m}$$

وبما أنّ الأنبوب يدور بمعدل 5.00×10^4 دورة لكلّ دقيقة، أو عند القسمة على $60\ \mathrm{s/min}$، $833\ \mathrm{rev/s}$. فإنّ الزمن اللازم لعمل دورة واحدة (الزمن الدوري) هو:

$$T = \frac{1}{(833\ \mathrm{rev/s})} = 1.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s/rev}$$

وعليه، فإنّ سرعة الجسم هي

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \left(\frac{0.377\ \mathrm{m/rev}}{1.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s/rev}}\right) = 3.14 \times 10^2\ \mathrm{m/s}$$

ويصبح التسارع المركزي

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(3.14 \times 10^2\ \mathrm{m/s})^2}{0.0600\ \mathrm{m}} = 1.64 \times 10^6\ \mathrm{m/s^2}$$

وعند القسمة على $g = 9.80\ \mathrm{m/s^2}$، نحصل على $1.67 \times 10^5\ g$.

أما السرعة عند أسفل الأنبوب $(r = 0.1000\ \mathrm{m})$ فهي

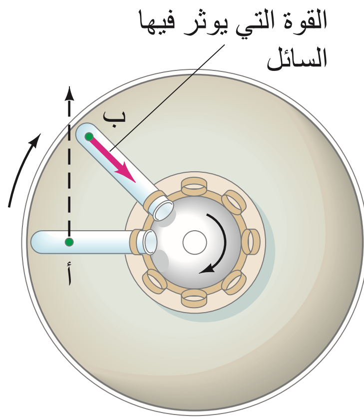
$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{(2\pi)(0.1000\ \mathrm{m})}{1.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s/rev}} = 523.6\ \mathrm{m/s}$$

لذا،

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(523.6\ \mathrm{m/s})^2}{(0.1000\ \mathrm{m})} = 2.74 \times 10^6\ \mathrm{m/s^2}$$

$$= 2.80 \times 10^5\ g\text{'s}$$

أو $280{,}000\ g$'s.



الشكل 5 – 17 موضعان لأنبوب اختبار يدور في جهاز طرد مركزي (منظر عُلويّ). وتمثل النقطة الخضراء عند أ جزيئًا مجهريًا أو جسمًا آخر تمّ ترسيبه، والذي سيميل إلى اتباع المسار المتقطع ليتجه نحو قاع الأنبوب. ولكن المائع سيمنع هذه الحركة، فيؤثر بقوة في الجزيء، كما هو مبين عند النقطة ب.

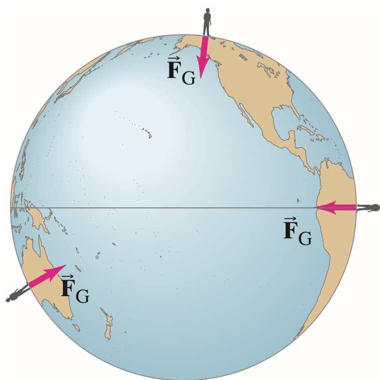
5-6 قانون نيوتن للجذب الكونيّ

أسرت حركة الكواكب والقمر مخيّلة العالم إسحاق نيوتن لفترة من الزمن، واستحوذت على تفكيره، وهي الفترة نفسها التي عمد خلالها على تطوير قوانينه الثلاثة في الحركة وصياغتها. كما وجعلت القوةُ اللازمة لإبقاء القمر في مداره شبه الدائري حول الأرض نيوتن متحيّرًا.

وبدأ نيوتن بالتفكير في طبيعة الجاذبية الأرضية ليستنتج أنّ الأجسام الساقطة باتّجاه الأرض والمسرعة نتيجة لذلك، لابدَّ لها وأن تخضع لقوة ما تؤثر فيها. لذا، فقد أطلق على هذه القوة قوة الجذب الأرضي. وقاده تفكيره إلى أنّه عندما يتأثر جسم أو يخضع لقوّةٍ ما، فإنّ هذه القوة بالطبع ستكون ناجّة من جسم آخر. لذلك كان التساؤل الذي يلحّ عليه وعمل على إجابته هو: ما مصدر الجاذبية الأرضية؟ ليستنتج نيوتن بناءً على ملاحظاته وتساؤلاته أنّ الأرض هي التي تؤثر بقوة الجاذبية في الأجسام الموجودة على سطحها. وعليه، فإنّ كلّ جسم يقع على سطح الأرض يتأثر بقوة الجاذبية، وأينما كان هذا الجسم، فإنّ اتجاه هذه القوة المؤثرة فيه سيشير إلى مركز الأرض (انظر إلى الشكل 5 – 18).

ووفق ما ورد، فإنّ نيوتن لاحظ سقوط التفاحة من الشجرة، وقيل بأنه استوحى من تلك الحادثة ما يلي: إذا كانت الجاذبية تؤثرعند قمم الأشجار وكذلك عند قمم الجبال . فربما سيظهر تأثير الجاذبية أيضا في كلّ مكان وعلى الأجسام جميعها ومن ضمنها القمر!

الشكل 5 – 18 تعمل قوة الجاذبية في أيّ مكان في العالم سواء كان ذلك في ألاسكا أو في البيرو، أو في أستراليا إلى الأسفل باتجاه مركز الأرض.



وانطلاقًا من فكرة أنّ الجاذبية الأرضية تعمل على إبقاء القمر في مداره، فقد طوّر نيوتن نظريته العظيمة عن الجاذبية. ولقد ظهر في ذلك الوقت بعض الجدل حول هذه النظرية؛ لأنّ كثيرًا من المفكرين في بداية الأمر كان يجد نفسه غير قادر على تقبل فكرة "القوة التي تعمل عن بعد". لقد كان الجميع في تلك الفترة يعي ويتقبل فكرة القوى العادية التي تعمل من خلال التلامس، مثل اليد التي تدفع عربة، أو تسحب سيارة شحن، أو المضرب الذي يدفع الكرة، وهكذا دواليك. أما فكرة الجاذبية التي تعمل عن بعد من غير تلامس فقد كانت غريبة وجديدة وتحتاج إلى وقفة تأمل. ومع هذا، فقد أعلن نيوتن للجميع بأنّ الأرض تؤثر بقوة في الأجسام المختلفة، مثل التفاحة الساقطة ومثل القمر في السماء، بالرغم من عدم ملامسة الأرض لهذه الأجسام، وعلى الرغم من المسافة الشاسعة التي تفصل بينها وبين الأرض كذلك.

وبدأ نيوتن بتحديد قيمة هذه القوة الجاذبة التي تؤثر بها الأرض في القمر مقارنة مع القوة الجاذبة للأجسام عند سطح الأرض. وقد كان تسارع القمر المركزي كما تم حسابه في (المثال 5 – 2) يساوي $a_R = 0.00272\ m/s^2$. ولدى مقارنته مع تسارع الجاذبية عند سطح الأرض $g = 9.80\ m/s^2$ وُجد أنّ:

تسارع القمر باتجاه الأرض

$$a_R = \frac{0.00272\ m/s^2}{9.8\ m/s^2} \approx \frac{1}{3600} g$$

أي أنّ تسارع القمر باتجاه الأرض هو $\frac{1}{3600}$ تقريبًا من تسارع الأجسام عند سطح الأرض. وبما أنّ القمر يبتعد مسافة 384,000 km عن الأرض وهو ما يعادل 60 ضعفًا لنصف قطر الأرض المكافئ لـ 6380 km، فإنّ القمر سيبتعد عن مركز الأرض مقدار 60 ضعفًا مقارنةً بالأجسام الموجودة على سطح الأرض.

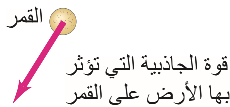
وبما أنّ $60 \times 60 = 60^2 = 3600$، فقد استنتج نيوتن أنّ قوّة الجاذبية التي تؤثر بها الأرض في الأجسام الأخرى تتناقص مع مربع بعدها r عن مركز الأرض:

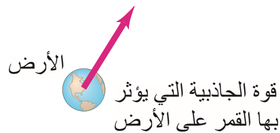
$$\text{قوة الجاذبية} \propto \frac{1}{r^2}$$

وأنّ القمر الذي يقبع على بعد يعادل 60 ضعف نصف قطر الأرض سيشعر بقوة جاذبية تعادل $\frac{1}{60^2} = \frac{1}{3600}$ ضعف ما ستشعر به كتلة مماثلة عند سطح الأرض. وأدرك نيوتن أنّ قوة الجاذبية على جسم ما لا تعتمد على بعده فقط، بل وعلى كتلته أيضًا. وفي حقيقة الأمر فهي تتناسب طرديًا مع كتلته كما رأينا. وبناءً على قانون نيوتن الثالث: عندما تؤثر الأرض في جسم ما، مثل القمر بقوة الجاذبية، فإنّ الجسم سيؤثر في الأرض بقوة جاذبية مماثلة تعادلها بالمقدار وتعاكسها بالاتجاه (الشكل 5 – 19). واستنتج نيوتن بسبب هذا التماثل أنّ قيمة قوة الجذب هذه يجب أن تتناسب مع كلّ من الكتلتين، وعليه

$$F \propto \frac{m_E m_{Obj}}{r^2}$$

حيث m_E هي كتلة الأرض، أما m_{Obj} فهي كتلة الجسم الآخر، في حين تمثل r المسافة من مركز الأرض إلى الجسم الآخر.





الشكل 5 – 19 تتجه قوة الجاذبية التي يؤثر بها جسم في آخر باتجاه الجسم الثاني وهي (حسب قانون نيوتن الثالث) مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه للقوة التي يؤثر بها الجسم الثاني في الأول.

وقد ذهب نيوتن إلى أبعد من ذلك خلال تحليله للجاذبية، وخطا خطوةً إضافية أخرى في الاستنتاج الذي توصل إليه نتيجة اختباره لمدارات الكواكب السيارة في أنّ القوة اللازمة لإبقاء الكواكب في مداراتها حول الشمس تتلاشى عكسيًا مع مربع بعدها عن الشمس. وهذا ما عزّز اعتقاده بأنّ قوة الجاذبية التي تعمل بين الشمس والكواكب السيارة التي تدور حولها هي التي تبقي هذه الكواكب في مداراتها. ومن ثَمّ تساءل: لماذا لا تعمل هذه الجاذبية أيضا بين الأجسام جميعها في الكون، وليس بين ما تم ذكره إلى الآن فقط ؟

وهنا اقترح نيوتن قانون الجذب الكوني، الذي نستطيع صياغته كالتالي:

كلّ جسم في الكون يجذب كلّ جسم آخر بقوة تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما، وتعمل هذه القوة على امتداد الخطّ الفاصل بين هذين الجسمين.

قانون نيوتن للجذب الكونيّ

ويمكن كتابة قيمة قوة الجاذبية هذه كما يلي:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}, \qquad (5-4)$$

حيث تمثل كلّ من m_1 و m_2 كتلتي الجسمين، في حين تمثل r المسافة الفاصلة بينهما. أما G فتمثل ثابت الجذب الكوني الذي يمكن قياسه تجريبيا، والتأكد من قيمته الرقمية الثابتة لمختلف الأجسام.

ونستطيع أن نجزم هنا نتيجة لعدم ملاحظتنا لأيّ قوة تجاذب بين الأجسام طبيعية الحجوم مثل تلك المتبادلة بين كرتي بيسبول بأنّ قيمة G صغيرة جدّا. وقد أجرى العالِم "هنري كافندش" أول تجربة لقياس القوة المتبادلة بين جسمين اعتياديين سنة 1798، أي بعد مرور أكثر من 100 عام على نشر نيوتن لقانونه. ولكي يستطيع " كافندش" قياس القوة المتناهية في الصغر وتحديدها بين جسمين صغيرين عاديين، فقد استخدم آلة كتلك المبينة في (الشكل 5 – 20). وأكد "كافندش"صحة فرضية نيوتن عن جذب الأجسام لبعضها بعضًا ودقة (المعادلة 5 – 4) القادرة على وصف القوة. بالإضافة إلى ذلك، ونتيجة لقدرة "كافندش" على قياس كلّ من F، و m_1، و m_2، و r بدقة، فقد استطاع أن يحدد قيمة الثابت G . إنّ قيمة ثابت الجذب الكوني المقبولة في أيامنا هذه هي

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$$

[تعطي (المعادلة 5 – 4) قيمة قوة الجذب الكوني التي يؤثر بها جسم في جسم آخر تفصل بينهما مسافة r. ويجب أن نعرف كيف نقيس r عندما يكون الجسم ممتدًّا (غير متمركز في نقطة). وغالبًا ما يتم ذلك باستخدام حساب التكامل الذي ابتكره العالم نيوتن. ولقد أوضح نيوتن أنّ (المعادلة 5 – 4) تعطي الشكل الصحيح للقوّة المتبادلة بين كرتين منتظمتين، حيث تمثل r المسافة الفاصلة بين مركزيهما. وعندما تكون الأجسام الممتدة صغيرة بالنسبة إلى المسافة الفاصلة بينها (كما في نظام الشمس والأرض) فسيكون بالإمكان إهمال نسبة الخطأ الناتجة عند التعامل مع هذه الأجسام وكأنها أجسام نقطية.]

المثال 5-10 قدّر هل يمكن لك أن تسحب شخصًا باتجاهك عن طريق قوة التجاذب؟

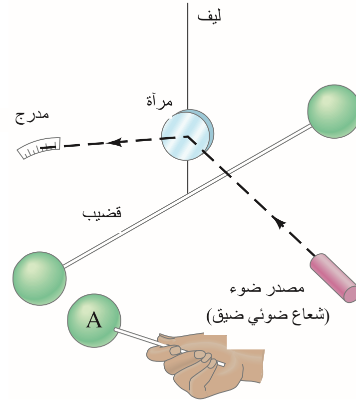
يجلس شخص كتلته 50-kg على مقعد بجوار شخص آخر كتلته 75-kg، قدر قيمة قوة جذب كلّ منهما للآخر؟

النّهج: تُعدّ هذه عملية تقديرية: لنجعل المسافة بينهما $\frac{1}{2}$m، ونقرب G إلى $10^{-10}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$.

الحــلّ: باستخدام (المعادلة 5 – 4):

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \approx \frac{(10^{-10}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2})(50\ \mathrm{kg})(75\ \mathrm{kg})}{(0.5\ \mathrm{m})^2} \approx 10^{-6}\ \mathrm{N}$$

و هي قيمة صغيرة و غير ملموسة إلا في حالة استخدام أجهزة حساسة جدّا.



الشكل 5-20 رسم تخطيطي لآلة كافندش. كرتان ملتصقتان بنهايتي عمود خفيف الوزن، ومعلق من منتصفه بوساطة خيط ليفي رفيع. وعند تقريب كرة ثالثة مسماة A من إحدى الكرتين المعلقتين، فإنّ قوة الجاذبية تعمل على تحريك الأخيرة ليسبب ذلك التواء خيط الليف قليلا. ويتم تضخيم الحركة الضئيلة باستخدام شعاع ضوئي ضيق يوجه إلى مرآة معلقة على الخيط الليفي لينعكس الشعاع على تدريج. إنّ التحديد المسبق لمدى كبر قوة ما تعمل على ليّ الخيط بمقدار معين يسمح بتحديد مقدار قوة التجاذب بين جسمين.

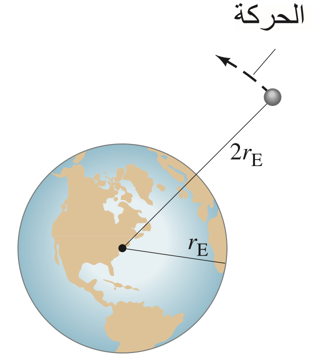
المثال 11-5 سفينة فضاء عند $2r_E$

مـا مقـدار قـوة الجاذبيـة المؤثـرة فـي سـفينة فضـاء كتلتهـا 2000-kg عندما تـدور حـول الأرض على ارتفـاع يعـادل نصـف قطـر الأرض $r_E = 6380\ \text{km}$ (الشـكل 5 – 21)؟ افـرض أنّ كتلـة الأرض هــي: $M_E = 5.98 \times 10^{24}\ \text{kg}$.

النّهج: على الرغم من استطاعتنا التعويض مباشرة في (المعادلة 5 – 4)، إلا أنّ هناك طريقة أخرى أكثر سهولة لحلّ السؤال اعتمادًا على بعد سفينة الفضاء عن مركز الأرض. وبما أنّ قوة الجاذبية تتناقص مع مربع المسافة $\frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$ أي أنّ قوة الجاذبية على القمر الصناعي ستعادل ربع وزنها عند سطح الأرض.

الحــلّ: إنّ قيمة F_G تعادل mg عند سطح الأرض. في حين تعادل ربع قيمتها العظمى على بعد $2r_E$ من مركز الأرض:

$$F_G = \tfrac{1}{4}mg = \tfrac{1}{4}(2000\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)$$
$$= 4900\ \text{N}$$



الشكل 5 – 21 (المثال 5 – 11).

المثال 12-5 القوة على القمر

أوجد القوة المحصلة المؤثرة في القمر $(m_M = 7.35 \times 10^{22}\ \text{kg})$ الناجمة من جذبه من قبل كلّ من الأرض $(m_E = 5.98 \times 10^{24}\ \text{kg})$ والشّمس $(m_S = 1.99 \times 10^{30}\ \text{kg})$ على افتراض أنّهما يصنعان زاوية قائمة فيما بينهما، كما في (الشكل 5 – 22).

النّهج: إنّ القوة المؤثرة في القمر هي قوة الجذب الناجمة عن كلّ من الشّمس F_{MS} والأرض F_{ME} كما هو موضح في مخطط الجسم الحرّ في (الشكل 5 – 22). وعليه، سنستخدم قانون التجاذب الكوني لإيجاد قيمة كلّ قوة على حدة، ومن ثم نجمع هاتين القوتين جمعا اتجاهيا.

الحــلّ: تبتعد الأرض عن القمر مسافة $3.84 \times 10^8\ \text{m} = 3.84 \times 10^5\ \text{km}$. لذا، فإنّ F_{ME} (قوة الجذب الكوني للقمر من قبل الأرض) تساوي

$$F_{ME} = \frac{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(7.35 \times 10^{22}\ \text{kg})(5.98 \times 10^{24}\ \text{kg})}{(3.84 \times 10^8\ \text{m})^2}$$
$$= 1.99 \times 10^{20}\ \text{N}.$$

وتبتعد الشّمس عن كلّ من الأرض والقمر مسافة $1.50 \times 10^8\ \text{km}$. لذلك، فإنّ F_{MS} (قوة الجذب الكوني للقمر من قبل الشّمس) هي

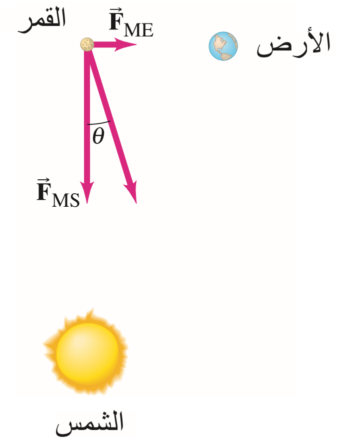
$$F_{MS} = \frac{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(7.35 \times 10^{22}\ \text{kg})(1.99 \times 10^{30}\ \text{kg})}{(1.50 \times 10^{11}\ \text{m})^2}$$
$$= 4.34 \times 10^{20}\ \text{N}.$$

وبالنظر إلى (الشكل 5 – 22) حيث تظهر القوتان متعامدتين على بعضهما بعضًا. سنستخدم نظرية فيثاغورس لنجد قيمة القوة الكلية:

$$F = \sqrt{(1.99 \times 10^{20}\ \text{N})^2 + (4.34 \times 10^{20}\ \text{N})^2} = 4.77 \times 10^{20}\ \text{N}$$

ويعطى اتجاه القوة الكلية بدلالة الزاوية θ (الشكل 5 – 22) حيث: $\theta = \tan^{-1}(1.99/4.34) = 24.6°$.

الشكل 5 – 22 (المثال 5 – 12) . تصنع مواضع كلّ من الشمس (S) والأرض (E) والقمر (M) زوايا قائمة بالنسبة إلى بعضها بعضا (الرسم غير دقيق).



ونذكّر هنا بضرورة الانتباه وعدم الخلط بين قانون الجذب الكوني، $F = G\frac{m_1m_2}{r_2}$ من جهة، وقانون نيوتن الثاني في الحركة، $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ من جهة أخرى؛ حيث يصف القانون الأول قوة الجاذبية وكيفية تغيّر قيمتها بدلالة كلّ من المسافة والكتلتين المعنيتين. وعلى الجانب الآخر، فإنّ قانون نيوتن الثاني يربط القوة المحصّلة المؤثّرة في جسم ما (أي المحصّلة المتجهة للقوى المختلفة جميعها المؤثرة في الجسم بغض النظر عن مصادرها) مع كتلة الجسم المعني وتسارعه.

تنويه: ميّز بين قانون نيوتن الثاني وقانون الجذب الكوني.

7-5 الجاذبية قرب سطح الأرض: تطبيقات فيزياء علوم الأرض.

عند تطبيق (المعادلة 5 − 4) لحساب قوة الجاذبية بين الأرض وجسم موجود على سطحها، فإنّ m_1، و m_2 . وr تمثل كلًّا من كتلة الأرض، وكتلة الجسم، وبعد الجسم عن مركز الأرض على الترتيب*. وستعادل قوة الجاذبية هذه بالنسبة إلى الأرض وزن الجسم mg:

$$mg = G\frac{mm_E}{r_E^2}$$

ونحلّ المعادلة لإيجاد تسارع الجاذبية الأرضية g عند سطح الأرض:

$$g = G\frac{m_E}{r_E^2} \quad (5-5)$$

g بدلالة G

أي أنّ تسارع الجاذبية عند سطح الأرض g سيُحدّد بدلالة كلّ من m_E و r_E. (ويجب عدم الخلط بين G و g لأنهما كميتان مختلفتان على الرغم من أنهما مترابطتان بالمعادلة 5 − 5).

تنويه:
ميز G من g

ولقد كانت قيمة الكتلة الأرضية لا تزال غير معروفة إلى أن تمّ قياس ثابت الجذب الكوني G. وبقياس G. فقد أصبح بالإمكان استخدام (المعادلة 5 − 5) لحساب كتلة الأرض، ليكون "كافندش" أول من قام بذلك. وعندما نعوض بقيمة $g = 9.80\ \mathrm{m/s^2}$ ونصف قطر الأرض $r_E = 6.38 \times 10^6\ \mathrm{m}$. فسنحصل من (المعادلة 5 − 5) على كتلة الأرض:

كتلة الأرض

$$m_E = \frac{gr_E^2}{G} = \frac{(9.80\ \mathrm{m/s^2})(6.38 \times 10^6\ \mathrm{m})^2}{6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}} = 5.98 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}$$

ويمكن تطبيق (المعادلة 5 − 5) على الكواكب الأخرى، علمًا بأنّ g، وm، وr سوف تشير إلى ثوابت تلك الكوكب.

المثال 5-13 قدّر **قيمة الجاذبية الأرضية عند قمّة جبل إيفريست**

قدر القيمة الفاعلة لـ g عند قمّة جبل إيفريست الذي يرتفع مسافة $8850\ \mathrm{m}$ (29,035 ft) فوق مستوى سطح البحر. واحسب تسارع الجاذبية للأجسام القادرة على السقوط الحر عند ذلك الارتفاع.

النّهج: تعتمد قوة الجاذبية (وتسارعها) على بعد الأجسام عن مركز الأرض. وعليه، فستكون فاعلية قيمة g عند قمة جبل إيفريست أصغر من قيمتها عند مستوى سطح البحر. وكتقدير مقبول، سوف نتعامل مع الأرض وكأنها كرة منتظمة.

الحـــلّ: نستخدم (المعادلة 5 − 5) بعد تعويض r_E بالقيمة التالية:

$$r = 6380\ \mathrm{km} + 8.9\ \mathrm{km} = 6389\ \mathrm{km} = 6.389 \times 10^6\ \mathrm{m}$$

ونحلّ لإيجاد الجاذبية الأرضية بما يلي:

$$g = G\frac{m_E}{r^2} = \frac{(6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2})(5.98 \times 10^{24}\ \mathrm{kg})}{(6.389 \times 10^6\ \mathrm{m})^2} = 9.77\ \mathrm{m/s^2}$$

وهو تخفيض بمقدار يقارب 3 أجزاء بالألف (0.3%).

ملحوظة: يُعدّ هذا تقريبًا مقبولًا؛ لأننا أهملنا الكتلة المتراكمة أسفل قمّة الجبل. بالإضافة إلى بعض الأشياء الأخرى.

الجدول 5 − 1 تسارع الجاذبية عند مواقع مختلفة على سطح الأرض

الموقع	الارتفاع (m)	g ($\mathrm{m/s^2}$)
نيويورك	0	9.803
سان فرانسيسكو	0	9.800
دنفر	1650	9.796
قمم بايك	4300	9.789
سيدني أستراليا	0	9.798
خط الاستواء	0	9.780
القطب الشمالي (حسابيا)	0	9.832

لاحظ أنّ (المعادلة 5 − 5) لا تعطي قيمًا دقيقة لـ g عند المناطق المختلفة لكون الأرض غير كروية تمامًا. ولأنّ كتلتها غير موزعة بانتظام. ولأنها كذلك تحتوي على الجبال والوديان والنتوءات المختلفة خاصةً عند خط الاستواء (انظر إلى الجدول 5 − 1). وبالرغم من أنّ دوران الأرض يؤثر في قيمة g. فإننا، ومن وجهة نظر تطبيقية، سنستخدم $g = 9.80\ \mathrm{m/s^2}$ للأجسام القريبة من سطح الأرض، ونعبّر عن وزن الجسم بدلالة mg في معظم الأحيان

* إنّ قياس المسافة من مركز الأرض لا يعني بأنّ قوة الجاذبية تنبثق من تلك النقطة. بل إن أجزاء الأرض جميعها تشارك بالجذب لتكون المحصلة قوة تعمل باتجاه مركز الأرض.

وتتغيّر قيمة g من موضع إلى آخر عند سطح الأرض بسبب الاختلافات الظاهرة في طبيعة تكوينها. ومن ضمنها توزيع الصخور المختلفة ذات الكثافات المختلفة على سطحها. ويعرف هذا التفاوت في قيمة g "بانحرافات الجاذبية" وهو مقدار صغير جدّا يتراوح بين جزء واحد لكلّ 10^6، أو جزء واحد لكلّ 10^7 من قيمة g. ومع هذا، فبالإمكان قياس هذه الانحرافات باستخدام جهاز قياس الجاذبية "*gravimeter*" بدقة تصل إلى جزء واحد لكلّ 10^9. ويستخدم علماء فيزياء الأرض هذه الأقيسة كجزء من استكشافاتهم للنفط والمعادن الأخرى، وكذلك في دراساتهم لتركيب القشرة الأرضية. وعلى سبيل المثال، فإنّ كثافة المعادن المترسبة تكون عادةً أعلى من كثافة الوسط المحيط بها. ويمكن لعجلة الجاذبية g أن تكون قيمتها أعلى بقليل عند قمة الطبقة الرسوبية مقارنةً بأطرافها؛ بسبب ازدياد الكتلة في الحجم المعني. وعادة ما يكتشف النفط تحت "القباب الملحية" ذات الكثافة المنخفضة. علمًا بأنّ البحث عن مناطق الانخفاض البسيط في قيمة g قد أفضى في السابق إلى اكتشاف النفط.

تطبيق الفيزياء
علوم الأرض: استكشاف النفط والمعادن

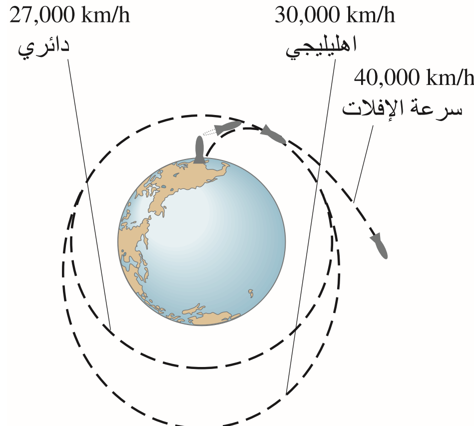
8-5 الأقمار الصناعية و"انعدام الوزن".

حركة الأقمار الصناعية علوم

تطبيق الفيزياء
أقمار صناعية أرضية

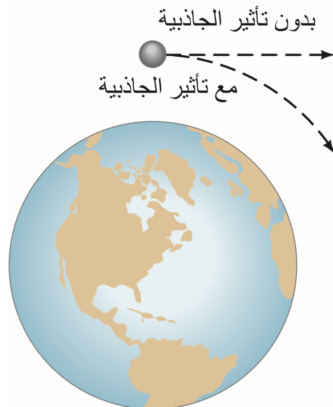
يُعدّ وجود الأقمار الصناعية المتحركة في مدارات حول الأرض في وقتنا الحالي أمرًا عاديًا (الشّكل 5 – 23) . ويتمّ وضع القمر الصناعي في مداره بعد إيصاله إلى سرعة مماسة كافية بمساعدة الصواريخ، كما هو موضح في (الشّكل 5– 24). ولكن إذا كانت هذه السرعة مرتفعة جدّا فإنّ مركبة الفضاء سوف تنطلق إلى الفضاء الخارجي دون أيّ أمل في رجوعها لانفلاتها من الجاذبية الأرضية. أمّا إذا كانت هذه السرعة منخفضة جدّا، فإنها قد تسبب في عودتها وسقوطها باتجاه الأرض. ويتم وضع هذه الأقمار الصناعية عادة في مداراتها الدائرية أو شبه الدائرية نظرا إلى أنها تتطلب سرعات إقلاع منخفضة.


الشكل 5 – 23 قمر صناعي يدور حول الأرض.



الشكل 5 – 24 إطلاق قمر صناعي بسرعات مختلفة.

ويتم التساؤل أحيانا: ما الذي سيبقي أيّ قمر صناعي في مداره؟ والحل هو بسبب سرعته المرتفعة . علمًا بأنّ القمر سيهوي باتجاه الأرض إذا ما توقف عن الحركة، أو أنه سينطلق إلى الفضاء الخارجي إذا تحرك بسرعة مرتفعة جدّا (الشّكل 5 – 25). وللجاذبية الأرضية دور مهم لإبقاء القمر في مداره. وفي حقيقة الأمر، فإنّ القمر يتسارع باستمرار هاويًا باتجاه الأرض، ولكن سرعته العالية المماسة تعمل على منعه من الاصطدام بها.



الشكل 5 – 25 "سقوط" قمر صناعي من مساره في خط مستقيم باتجاه الأرض.

المثال 14-5 قمر صناعي متزامن مع دوران الأرض Geosynchronous satellite

إنّ القمر الصّناعيّ المتزامن مع دوران الأرض هو القمر الذي يبقى عند نقطة واحدة ثابتة فوق الأرض. وهذا ما لا يمكن تحقيقه إلا إذا كانت هذه النقطة تقع فوق خط الاستواء. تستخدم هذه الأنواع من الأقمار الصناعية للبث المرئي والإذاعي، ولإجراءالاتصالات، إضافةً إلى المساعدة في التنبؤ بالأحوال الجوية. حدّد: (أ) الارتفاع الضروري لمدار القمر الصناعي فوق سطح الأرض. (ب) سرعة القمر الصناعي. ومن ثَمَّ (جـ) قارن سرعته مع سرعة قمر يدور حول سطح الأرض على ارتفاع 200 km.

النّهج: من أجل بقاء هذا القمر عند نقطة واحدة فوق الأرض وهي تدور، يجب أن يكون الزمن الدوري للقمر هو يوم واحد. وإذا فرضنا أنّ مداره دائري تمامًا، فعندها نستطيع تطبيق قانون نيوتن الثاني، $F = ma$، حيث $a = v^2/r$.

الحــلّ: (أ) إنّ القوة الوحيدة المؤثرة في القمر الصناعي هي قوة الجذب الكوني. وعليه، يمكن الحصول على القوة من (المعادلة $4-5$). ومن ثم نعوضها في قانون نيوتن الثاني

$$F = ma$$

$$G\frac{m_{Sat}m_E}{r^2} = m_{Sat}\frac{v^2}{r}$$ [معادلة القمر الصّناعيّ]

وتحتوي هذه المعادلة على مجهولين: r و v. ولكن القمر يدور حول الأرض خلال زمن دوران الأرض نفسه حول محورها، أي مرة واحدة خلال كلّ 24 ساعة تقريبا. لذا، فإنّ سرعة القمر يجب أن تكون

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

حيث $T =$ يوما واحدا $= (24h)(3600\text{ s/h}) = 86{,}400\text{ s}$.

ونعوض هذا المقدار في "معادلة القمر الصناعي" أعلاه، وبعد اختصار كتلة القمر الصناعي من جانبي المعادلة نحصل على

$$G\frac{m_E}{r^2} = \frac{(2\pi r)^2}{rT^2}$$

وبعد الاختصار نجد أنّ

$$r^3 = \frac{Gm_E T^2}{4\pi^2} = \frac{(6.67\times10^{-11}\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(5.98\times10^{24}\text{ kg})(86{,}400\text{ s})^2}{4\pi^2}$$
$$= 7.54\times10^{22}\text{ m}^3$$

وعند أخذ الجذر التكعيبي نحصل على $r = 4.23\times10^7\text{ m}$، أو 42,300 km من مركز الأرض. وعندما نطرح مقدار نصف قطر الأرض (6380 km)، سنكتشف بأنّ القمر الصناعي المتزامن مع دوران الأرض يجب أن يدور فوق سطح الأرض على ارتفاع 36,000 km (حوالي $6r_E$).(ب) وعندما نحلّ معادلة القمر الصناعي كما أعطيت أعلاه في (أ) فسنحصل على v

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} = \sqrt{\frac{(6.67\times10^{-11}\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(5.98\times10^{24}\text{ kg})}{(4.23\times10^7\text{ m})}} = 3070\text{ m/s}$$

وسنتوصل إلى النتيجة نفسها كذلك إذا استخدمنا $v = 2\pi r/T$.

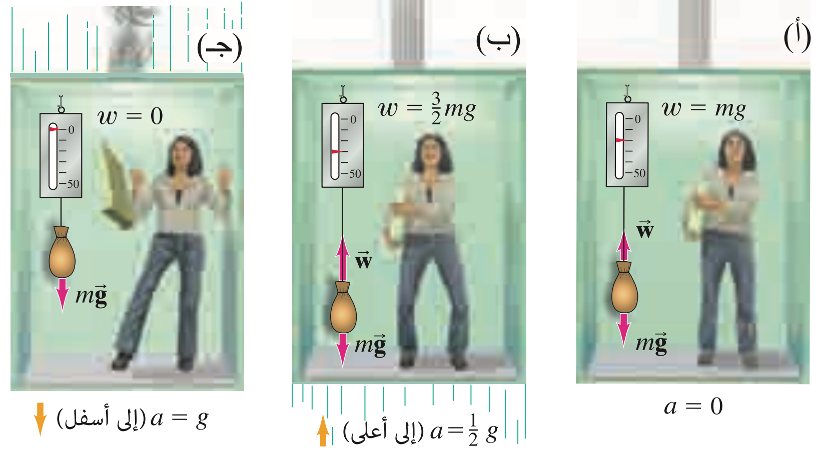
(ج) تظهر المعادلة في فرع (ب) أن $v \propto \sqrt{1/r}$. لذلك، عند التعويض في قيمة $r = r_E + h = 6380\text{ km} + 200\text{ km} = 6580\text{ km}$ سنحصل على

$$v' = v\sqrt{\frac{r}{r'}} = (3070\text{ m/s})\sqrt{\frac{(42{,}300\text{ km})}{(6580\text{ km})}} = 7780\text{ m/s}$$

ملحوظة: يقع مركز دوران القمر الصناعي دائمًا عند مركز الأرض. وعليه، فمن غير الممكن أن تجد قمرًا صناعيًّا يدور حول نقطة ثابتة فوق الأرض عند أيّ ارتفاع عدا عند $0°$.

تطبيق الفيزياء
أقمار صناعية متزامنة مع دوران الأرض

التمرين ز : يدور قمران صناعيان حول الأرض بمدارين دائريين لهما نصف القطر نفسه. فإذا كانت كتلة أحدهما ضعف كتلة الآخر، فأيّ من العبارات التالية صحيحة بالنسبة إلى سرعتيهما: (أ) يتحرك القمر الصناعي الأثقل بضعف سرعة القمر الأخف. أم (ب) يمتلك القمران الصناعيان السرعة نفسها. أم (جـ) يتحرك القمر الأثقل بأربعة أضعاف سرعة القمر الأخفّ؟



الشكل 5 – 26 (أ) يؤثر جسم داخل مصعد في ميزان زنبركي بقوة تعادل وزنه. (ب) الوزن الظاهري لجسم داخل مصعد يتسارع إلى الأعلى بمعدل $\frac{1}{2}g$ أكبر بمعدل $1\frac{1}{2}$ من الوزن الحقيقي. (جـ) يشعر الجسم داخل مصعد يسقط سقوطًا حرًا "بانعدام الوزن": ويقرأ الميزان صفرًا.

انعدام الوزن

"انعدام الوزن" داخل مصعد يهوي إلى الأسفل.

يخضع الموجودون جميعهم من أناس ومقتنياتهم لظاهرة انعدام الوزن وهم داخل قمر صناعي يدور حول الأرض. لنتناول المصعد الهابط أولًا كمثال بسيط. تتدلى حقيبة معلقة من ميزان زنبركي داخل مصعد ساكن. كما هو مبين في (الشّكل 5 – 26 أ). وتظهر قراءة الميزان قوة الحقيبة المؤثرة في الميزان إلى أسفل، التي تعادل في القيمة وتعاكس بالاتّجاه القوةَ المؤثرة في الحقيبة إلى أعلى. ونعبّر عن قيمة هذه القوة بالوزن w. وعليه، فهناك قوتان تؤثران في الحقيبة وهما: قوة الجاذبية الأرضية التي تشير إلى الأسفل، وقوة الميزان التي تشير إلى الأعلى (قانون نيوتن الثالث) وقيمتها w. وعندما نطبق قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$ على الحقيبة، وبسبب عدم تسارعها كما في (الشكل 5 – 26 أ)، فإننا نحصل على

$$w - mg = 0$$

حيث mg هي وزن الحقيبة. وعليه، فإنّ $w = mg$ وبما أنّ الميزان يشير إلى القوة w التي تؤثر بها الحقيبة فيه، فهو يسجل قوة تعادل وزن الحقيبة كما كان متوقعًا. ولكن إذا كان المصعد يتحرك بتسارع a ، فإننا نحصل على $w - mg = ma$ عند تطبيق قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$ على الحقيبة.
وعندما نحلّ لإيجاد w، فسيكون الناتج

$$w = mg + ma \qquad \text{[تشير } +a \text{ إلى الأعلى]}$$

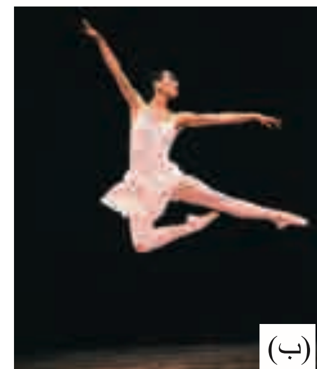
وإذا أشارت a إلى الأعلى فستكون ذات قيمة موجبة. لذا، سيقرأ الميزان مقدارًا أكبر من mg. وتُسمّى عندها w الوزن الظاهري للحقيبة. وفي هذه الحالة، ستكون أكبر من الوزن الأصلي (mg). وأما إذا تسارع المصعد إلى الأسفل، فسوف تكون a سالبة، ويصبح الوزن الظاهري w أقلّ من mg. ونشير هنا إلى أنّ اتجاه $\vec{\mathbf{a}}$ هو الوحيد الذي يؤثر في قراءة الميزان الذي لا يتأثر باتّجاه السرعة اللحظية $\vec{\mathbf{v}}$.
وعلى سبيل المثال، لو تسارع مصعد إلى الأعلى بمقدار $\frac{1}{2}g$، فسيتأثر وزن الحقيبة الظاهري ليصبح

$$w = mg + m(\tfrac{1}{2}g) = \tfrac{3}{2}mg$$

أي أنّ قراءة الميزان ستظهر $1\frac{1}{2}$ ضعف الوزن الأصلي (الشكل 5 – 26 ب). وكذلك سيكون الوضع بالنسبة إلى شخص ما في المصعد حيث سيعادل وزنه الظاهري (أي قوة دفع أرض المصعد الرّأسيّة له) $1\frac{1}{2}$ ضعف وزنه الأصلي. ونستطيع القول هنا بأنه سيتأثر بتسارع جاذبية يعادل $1\frac{1}{2}$ وهذا مشابه لما سيشعر به رواد الفضاء من مضاعفات عجلة الجاذبية الأرضية g عند انطلاق مركباتهم.
ولكن إذا كان تسارع المصعد $a = -\frac{1}{2}g$ إلى الأسفل، فسيصبح الوزن الظاهري $w = mg - \frac{1}{2}mg = \frac{1}{2}mg$. وعليه، فإنّ قراءة الميزان ستظهر نصف الوزن الأصلي. وأخيرًا، إذا ما سقط المصعد سقوطًا حرًّا نتيجة انقطاع أسلاك كوابحه، فستصبح $a = -g$. لذا، فإنّ الوزن الظاهري سيؤول إلى الصفر $w = mg - mg = 0$ لتظهر الحقيبة وكأنها بلا وزن (انظر الشّكل 5 – 26 ج). فإذا كان هناك شخص ما داخل المصعد وهو في وضع السقوط الحرّ متأثر بالجاذبية الأرضية ($-g$) وأوقع هذا الشخص قلمًا من يده، فإنّ القلم لن يصل إلى أرض المصعد مع أنه يسقط إلى الأسفل بتسارع g. إنّ هذا في حقيقة الأمر ما سيحدث؛ لأنّ كلًّا من أرض المصعد والشخص الموجود داخله يهوي إلى الأسفل في الوقت نفسه، وبتسارع الجاذبية الأرضية. وتُسمَّى هذه الظاهرة "انعدام الوزن الظاهري" لأنّه خلال الإطار المرجعي للشخص، فإنّ الأغراض لا تسقط، وتبدو وكأنها دون وزن بالرغم من عدم اختفاء الجاذبية. ونستطيع الجزم بأنّ الجاذبية لا تزال تؤثر في الجسم الساقط، وأنّ وزنه لا يزال يعادل mg.

الشكل 5 – 27 الشعور بانعدام الوزن على الأرض.







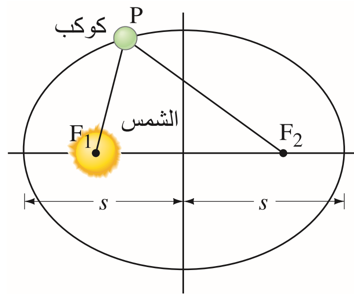
وتظهر الأجسام داخل المصعد وكأنها بلا وزن خلال فترة هبوط المصعد إلى أسفل، أو خلال سقوطه سقوطًا حرًّا. وقد يكون هذا بالإضافة إلى عدم وجود أيّ قوة تلامس محفّزًا على الشعور بالوزن خلال السقوط. إنّ ظاهرة انعدام الوزن الذي يشعر بها الرّواد في القمر الصناعي ذي المدارالقريب من سطح الأرض مشابهة تمامًا لانعدام الوزن الظاهري الذي يشعر به الشخص الموجود في مصعد يسقط سقوطًا حرًّا. وللوهلة الأولى، لعلّه يُعدّ شيئًا غريبًا أن يتمّ التفكير في القمر الصناعي وكأنّه يسقط سقوطًا حرًّا. وفي حقيقة الأمر هذا ما يحدث فعلًا؛ حيث يتهاوى القمر الصناعي باتّجاه الأرض كما يظهر في (الشّكل 5 – 25). وتتسبب قوة الجاذبية الأرضية بسقوطه خارج مساره الطبيعي ذي الخطّ المستقيم. وبما أنّ تسارع القمر هو نفسه تسارع الجاذبية الأرضية عند ذلك الموضع، فإنّ القوة الوحيدة التي ستؤثر فيه هي قوة الجاذبية. لذلك، وبالرغم من أنّ قوة الجاذبية تؤثر في الأجسام داخل القمر الصناعي، فإنّ الأجسام ستشعر بانعدام الوزن الظاهريّ وكأنها تسقط سقوطا حرّا بسبب تسارعها مع القمر الصناعي.

"انعدام الوزن" داخل قمر صناعيّ

يظهرالشكل 5 – 27 أمثلة لأشخاص على الأرض يخضعون للسقوط الحرّ، ولظاهرة انعدام الوزن الظاهري للحظات قصيرة.

وهناك حالة أخرى مختلفة تحدث عندما تكون سفينة الفضاء بعيدة عن كلّ من الأرض والقمر والأجسام الأخرى الجاذبة لها جميعها. وفي هذه الحالة، تكون قوة الجاذبية المؤثرة فيها صغيرة جدًّا كنتيجةٍ مباشرةٍ لبعدها عنهما، مما يؤدّي إلى شعور الأشخاص على متن تلك السفينة بانعدام وزنهم.

* 9-5 قوانين كبلر وتركيب نيوتن



الشكل 5 – 28 (أ) قانون كبلر الأول. القطع الناقص هو منحنى مغلق بحيث تكون مجموع المسافات من أيّ نقطة P على المنحنى إلى نقطتين معينتين (تسميان البؤرتين F_1 و F_2) مقدارًا ثابتًا. أي أنّ مجموع المسافتين $F_1P + F_2P$ ثابت للنقاط جميعها التي على المنحنى. وتُعدّ الدائرة حالة خاصّة من القطع الناقص حيث تتحد البؤرتان عند مركز الدائرة.

قدّم عالِم الفلك الألماني جوهانز كبلر (1571 – 1630) وصفًا دقيقًا لحركة الكواكب حول الشّمس قبل أن يقترح نيوتن قوانين الحركة الثلاثة، وقانون الجذب الكوني بأكثر من نصف قرن. وتتضمن الوصف الدقيق ثلاثة اكتشافات عمليّة نشير إليها اليوم بقوانين كبلر لحركة الكواكب. ويمكن تلخيصها بعد الاستعانة بالرسومات التوضيحية المبينة في (الشّكلين 5 – 28 و 5– 29) كالتالي:

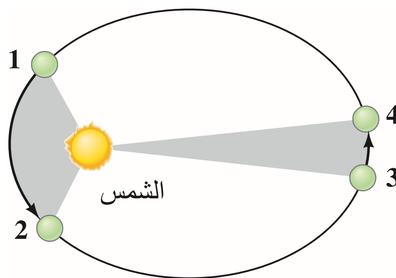
قانون كبلر الأول: يدور كلّ كوكب من كواكب المجموعة الشمسية في مسار إهليلجيّ (على شكل قطع ناقص) حول الشمس الموجودة عند إحدى بؤرتيه (الشكل 5 – 28).

قانون كبلر الثاني: يمسح الخطّ المستقيم الوهمي الواصل بين الشمس وأيّ كوكب يدور حولها مساحات متساوية خلال فترات زمنية متساوية (الشكل 5 – 29).

قانون كبلر الثالث: تعادل نسبة مربع الزمنين الدوريين لكوكبين يدوران حول الشمس نسبة مكعب بعديهما عنها $(T_1/T_2)^2 = (s_1/s_2)^3$.

[ويمثل s المحور شبه الرئيس الذي تمّ تعريفه على أنه نصف محور المدار الطويل (الرئيس)، كما هو موضح في الشّكل 5 – 28]. ونستطيع أن نعدّه أيضًا متوسط بعد الكوكب عن الشّمس. (ويظهر الجدول 5 – 2) بيانات حديثة : انظر إلى العمود الأخير.

الشكل 5 – 29 قانون كبلر الثاني. للمنطقتين المظللتين المساحة نفسها. يتحرك الكوكب من النقطة 1 إلى النقطة 2 خلال الفترة الزمنية نفسها التي يستغرقها للتحرك من النقطة 3 إلى النقطة 4. وتتحرك الكواكب بسرعات أعلى خلال مداراتها عندما تكون قريبة من الشمس.



لقد وصل كبلر إلى قوانينه نتيجة تحليله الدقيق للقراءات العملية، واستطاع نيوتن بعد ذلك بخمسين عامًا اشتقاق قوانين كبلر بطريقة رياضية مستندًا إلى قانون الجذب الكوني وقوانين الحركة. ولقد أظهر أنّه يوجد شكل وحيد لقانون الجاذبية يتلاءم مع قوانين كبلر، ويعتمد على التربيع العكسي للمسافة. وبذلك يكون نيوتن قد استخدم قوانين كبلر دليلًا على قانونه للجذب الكوني كما أوجزه في (المعادلة 5 – 4).

الجدول 5 – 2 بيانات الكواكب مطبقة على قانون كبلر الثالث.

الكوكب	متوسط المسافة من الشمس $s(10^6\ \text{km})$	الزمن الدوري T	s^3/T^2 $(10^{24}\ \text{km}^3/\text{y}^2)$
عطارد	57.9	0.241	3.34
الزهرة	108.2	0.615	3.35
الأرض	149.6	1.0	3.35
المريخ	227.9	1.88	3.35
المشتري	778.3	11.86	3.35
زُحل	1427	29.5	3.34
أورانوس	2870	84.0	3.35
نبتون	4497	165	3.34
بلوتو	5900	248	3.34

اشتقاق قانون كبلر الثالث

سنشتق الآن قانون كبلر الثالث للحالة الخاصة للمدار الدائري مفترضين أنّ معظم مدارات الكواكب قريبة جدّا من الدائرية. وسنكتب أولًا قانون نيوتن الثاني في الحركة $\Sigma F = ma$. ومن ثم سنعوض عن قيمة F باستخدام قوة الجذب الكوني بين الشمس وكوكب آخر كتلته m_1 باستخدام (المعادلة 5 – 4). ونعوّض عن a بالتسارع المركزي v^2/r. وسنفرض بأنّ كتلة الشّمس M_S أكبر بكثير من كتلة كواكبها. وعليه، فإنّ

$$\Sigma F = ma$$

$$G\frac{m_1 M_S}{r_1^2} = m_1\frac{v_1^2}{r_1}$$

لتمثل r_1 بُعد أحد هذه الكواكب عن الشمس، في حين تمثل v_1 متوسط سرعة هذا الكوكب في مداره. أما M_S فتمثل كتلة الشمس، علمًا بأنّ جذب الشمس هو ما سيبقي الكواكب في مساراتها. ويُعدّ الزمنُ الدوري T_1 للكوكب الزمنَ اللازم لهذا الكوكب، لكي ينهي دورةً واحدةً كاملة، وهي مسافة تعادل محيط مداره $2\pi r_1$. وعليه، فإنّ

$$v_1 = \frac{2\pi r_1}{T_1}$$

ونعوض هذا في المعادلة أعلاه

ونعيد ترتيب القانون لنحصل على

$$G\frac{m_1 M_S}{r_1^2} = m_1\frac{4\pi^2 r_1}{T_1^2}$$

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S} \qquad \text{(5 – 6 أ)}$$

وبذلك تم اشتقاق هذه المعادلة للكوكب الأول (وليكن كوكب المريخ). ويمكن تطبيق الاشتقاق نفسه على أي كوكب آخر يدور حول الشّمس (مثل كوكب زحل):

$$\frac{T_2^2}{r_2^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}$$

حيث إن T_2، و r_2 هما الزمن الدوري ونصف قطر مدارالكوكب الثاني على الترتيب. وبما أنّ الحدّ الأيمن من المعادلتين السابقتين متساو، فسنجد أنّ $T_1^2/r_1^3 = T_2^2/r_2^3$، أو بإعادة الترتيب:

قانون كبلر الثالث

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 \qquad \text{(5 – 6 ب)}$$

وهذا هو قانون كبلر الثالث.

ومع أنّ اشتقاق (المعادلتين السابقتين 5 – 6 أ و 5 – 6 ب) قد تم بناءً على المقارنة بين كوكبين يدوران حول الشمس، إلّا أنّه من الممكن تطبيقهما على أنظمة أخرى لعموميتهما. وكمثال على ذلك، نستطيع تطبيق (المعادلة 5 – 6 أ) على قمرنا الذي يدور حول الأرض (وعندها نضع M_E "كتلة الأرض" مكان M_S "كتلة الشّمس"). وانستطيع أيضًا تطبيق (المعادلة 5 – 6 ب) للمقارنة بين قمرين يدوران حول الكوكب نفسه كالمشتري. وبما أنّ قانون كبلر الثالث ينطبق على الأجسام التي تدور حول المركز الجاذب نفسه فقط، فلن نستطيع استخدام (المعادلة 5 – 6 ب) للمقارنة بين دوران القمر حول الأرض من ناحية، ودوران المريخ حول الشّمس من ناحية أخرى؛ لأنّ كلًّا منهما يعتمد على مركز جذب مختلف.

تنويه: قارن مدارات الأجسام حول المركز نفسه فقط.

وسنفترض الآن بأنّ المدارات في الأمثلة التالية جميعها دائرية، على الرغم من مخالفة هذا للواقع.

المثال 5-15 أين يقع المريخ؟

لاحظ كبلر أنّ الزمن الدوريّ للمريخ (عام واحد) يعادل 687 يومًا (من أيام الأرض) تقريبًا، أي مايعادل (687 d/365 d)=1.88yr من سنوات الأرض. حدّد بُعْدَ المريخ عن الشّمس باستخدام الأرض مرجعًا.

النهج: بما أننا نعلم الزمن الدوري لكلّ من الأرض والمريخ، وكذلك بُعد الأرض عن الشمس، فإنّنا نستطيع استخدام قانون كبلر الثالث للحصول على بُعد المريخ عن الشمس.

الحـــــلّ: يعادل الزمن الدوريّ للأرض $T_E = 1\ \text{yr}$ سنة واحدة. وتبتعد الأرض عن الشــــــمس مسافة $r_{ES} = 1.50 \times 10^{11}\ \text{m}$. ونكتب من قانون كبلر الثالث (معادلة 5 – 5 ب):

$$\frac{r_{MS}}{r_{ES}} = \left(\frac{T_M}{T_E}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{1.88\ \text{yr}}{1\ \text{yr}}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.52$$

أي أنّ المريخ يبتعد 1.52 مرة ضعف بعد الأرض عن الشمس، أو $2.28 \times 10^{11}\ \text{m}$ متر.

المثال 5-16 تحديد كتلة الشمس

تطبيق الفيزياء
تحديد كتلة الشمس

حدّد كتلة الشّمس بدلالة بُعد الأرض عنها، أو $r_{ES} = 1.5 \times 10^{11}\ \text{m}$.

النّهج: يرتبط الزمن الدوري وبُعد أيّ كوكب يدور حول الشمس (الأرض في هذا المثال) بكتلة الشمس M_S حسب (المعادلة 5 – 6 أ).

الحـلّ: نحسب الزمن الدوريّ للأرض كالتالي: $T_E = 1\ \text{yr} = (365\tfrac{1}{4}\,\text{d})(24\ \text{h/d})(3600\ \text{s/h}) = 3.16 \times 10^7\ \text{s}$
ونحلّ (المعادلة 5 – 6 أ) من أجل M_S:

$$M_S = \frac{4\pi^2 r_{ES}^3}{GT_E^2} = \frac{4\pi^2(1.5 \times 10^{11}\ \text{m})^3}{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(3.16 \times 10^7\ \text{s})^2} = 2.0 \times 10^{30}\ \text{kg}$$

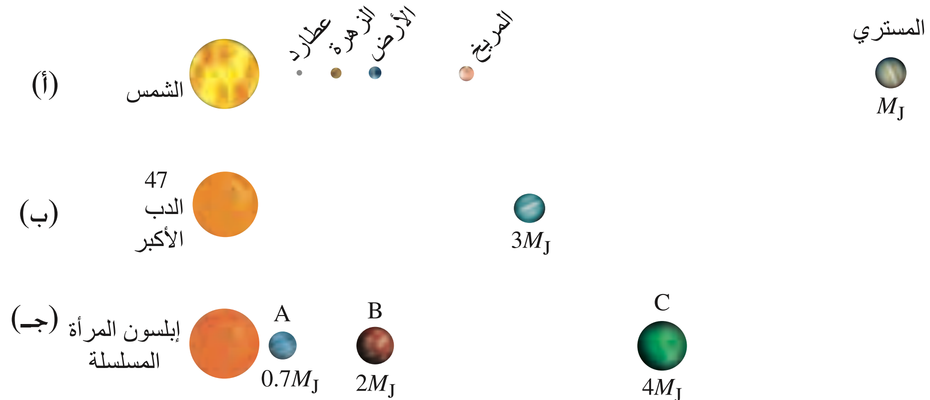
اضطرابات كواكب واكتشافها

لقد أظهرت الأقيسة الدقيقة لمدارات الكواكب عدم اتباع الكواكب قوانين كبلر بدقة. فقد لوحظت على سبيل المثال - انحرافات طفيفة على مدارات الكواكب البيضوية. وقد توقع نيوتن حدوث ذلك معلّلا - بأنّ الكواكب لن تتأثر بقوّة جذب الشمس لها فقط، بل بقوّة جذبها الضعيفة لبعضها بعضًا أيضًا. ولقد كانت هذه الانحرافات أو **الاضطرابات** البسيطة جدّا في مدار زحل بمثابة التلميح الذي ساعد نيوتن على صياغة قانون الجذب الكوني، مفترضًا أنّ الأجسام جميعها تجذب بعضها بعضًا. وأفضت ملاحظة هذه الاضطرابات البسيطة لاحقًا إلى اكتشاف كوكبي نبتون وبلوتو. وعلى سبيل المثال، فلقد كان من غير الممكن إرجاع الانحرافات جميعها في مدار أورانوس (سابع الكواكب السيارة) إلى الاضطرابات الناجمة من الكواكب الأخرى المعروفة في حينه. وأشارت الحسابات الدقيقة لاحقًا في القرن التاسع عشر إلى تفسير هذه الانحرافات، بناءً على وجود كوكب آخر في المجموعة الشمسية نفسها. كما تمّ التنبؤ بموضع الكوكب الجديد استنادًا إلى هذه الحسابات، وعند النظر من خلال التليسكوب (المقراب) بالاتجاه المحسوب فقد عُثر على الكوكب الجديد، الذي سُمّي لاحقاً "نبتون". وأفضت الاضطرابات الصغيرة جدًّا في مدار كوكب نبتون إلى اكتشاف كوكب بلوتو في عام 1930. ولقد تم اكتشاف عدد من الكواكب السيارة حول النجوم البعيدة منذ منتصف تسعينيّات القرن العشرين (الشّكل 5 – 30) بدلالة "التذبذب" المنتظم لكلّ نجم نتيجة انجذابه باتجاه الكوكب (أو الكواكب) الدوّارة حوله.

كواكب حول نجوم أخرى

تركيبات نيوتن

ويُعدّ تطوير نيوتن لقانون الجذب الكوني وقوانين الحركة الثلاثة إنجازًا فكريًّا رئيسًا، حيث استطاع وصف حركة الأجسام على الأرض وفي الفضاء باستخدام هذه القوانين. واتضح أنّ هذه الأجسام السماوية وكذلك الأجسام على سطح الأرض تتبع القوانين نفسها. ولهذا السبب تحديدًا، بالإضافة إلى قيام نيوتن بدمج نتائج العلماء السابقة في نظامه، فإنّنا نتكلم أحيانًا عمّا يُسَمّى بـ "تركيب نيوتن".



الشكل 5 – 30 يقارن نظامنا الشمسي (آ) بالكواكب السيارة المكتشفة حديثًا. (ب) وبالنجم 47 آوريس ماجوريس M_J. (جـ) والنجم إسيلون آندروميدا مع ثلاثة كواكب على الأقل M_J له كتلة المشتري نفسها (الرسوم ليست بالمقياس الدقيق).

السببية

يشار إلى القوانين التي صاغها نيوتن **بقوانين السّبب**. ويقصد **بالسّببيّة** هنا إمكانية أن يفضي حدث ما إلى حدث آخر. فعندما يُضرب زجاج نافذة بحجر نستنتج أنّ الحجر قد يتسبب بكسر هذا الزجاج. ومن الممكن اعتبار قوانين نيوتن على أنّها ذات صلة بفكرة "السبب والأثر". حيث يُنظر إلى الجسم المتسارع على أنه (الأثر) الناتج من تأثّره بمحصلة قوى (السبب).

10-5 أشكال القوى في الطبيعة.

لقد ناقشنا سابقًا قانون نيوتن للجذب الكوني (المعادلة 5 – 4) الذي يصف كيفية اعتماد قوّةٍ ما مثل قوّة الجاذبيّة على الكتل ذات الصلة، وعلى المسافات الفاصلة بينها. وعلى الوجه الآخر، فإنّ قانون نيوتن الثاني $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$ يخبرنا كيف سيتسارع جسم ما إذا ما تأثّر بقوّة خارجيّة. ولكي تكتمل الصورة؛ يجب أن نتساءل عن أنواع القوى المختلفة الأخرى الموجودة في الطبيعة، إضافةً إلى قوة الجاذبية.

بدأ الفيزيائيون في القرن العشرين بالتمييز بين أربعة أنواع من القوى في الطبيعة، وهي: (1) قوة الجاذبية. (2) القوة الكهرومغناطيسيّة (وسوف نرى لاحقًا كيف أنّ كلًّا من القوى الكهربائية والمغناطيسيّة ترتبط إحداهما بالأخرى ارتباطًا وثيقًا). (3) القوّة النووية الشديدة. (4) القوة النووية الضعيفة. ولقد ناقشنا في هذا الفصل قوة الجاذبية بالتفصيل. وسوف نتناول طبيعة القوّة الكهرومغناطيسيّة ابتداءً من الفصل السادس عشر حتى نهاية الفصل الثاني والعشرين. vوتعمل القوى النووية الشديدة والضعيفة التي ستناقش ابتداءً من الفصل الثلاثين وحتى الفصل الثاني والثلاثين على مستوى نواة الذرة. ومع أنّ القوى الأخيرة تظهر جليّةً خلال النشاط الإشعاعي والطاقة النووية، إلا أنّها لا تظهر بوضوح في الحياة اليومية.

الكهرباء الضعيفة و GUT

ولا يزال الفيزيائيون يحاولون استنباط النظريات الموحّدة لهذه القوى الأربع؛ أي اعتبار هذه القوى جميعها أو بعضها أشكالًا مختلفةً لقوّة أساسيّة واحدة. وحتى وقتنا الحالي، فقد تمّ توحيد كلٍّ من القوتين الكهرومغناطيسيّة والنوويّة الضعيفة نظريًّا لتشكيل النظريّة الكهرباء الضعيفة، التي يتم النظر من خلالها إلى القوة الكهرومغناطيسيّة والقوة النوويّة الضعيفة كشكلين مختلفين من أشكال القوة الكهرباء الضعيفة المنفردة. وتُعدّ محاولات الدفع باتجاه التوسّع بتوحيد القوى فيما يعرف بالنظريات الموحّدة العملاقة (GUT) موضوعَ الأبحاث النشطة الحالية.

القوى التي نتعامل معها يوميا هي الجاذبية والكهرومغناطيسية.

ولكن، ما مكانة أو موضع القوى التي نتعامل معها في حياتنا اليومية من كلّ هذا المخطط؟ تُعدّ القوى جميعها التي نتعامل معها في حياتنا اليومية، كالدفع، والسحب، والأشكال الأخرى لقوى التلامس مثل القوة العمودية (أو الرأسية)، وقوة الاحتكاك ناتجَ القوة الكهرومغناطيسية التي تعمل على المستوى الذرّي . ومثالًا على ذلك القوة التي تؤثّر بها أصابعك في القلم، التي تنتج من التنافر الكهربائي بين إلكترونات المدارات الخارجية لذرّات كلّ من الأصابع والقلم.

ملخّص

يخضع الجسم الذي يتحرّك بسرعةٍ ثابتة v على محيط دائرة نصف قطرها r **لحركة دائريّة منتظمة**. ويتجه تسارع الجسم المركزي a_{R} نحو مركز الدائرة على امتداد نصف قطرها للداخل (يُسمّى أيضًا **التّسارع القطري**) وتُعطى قيمته بالمعادلة التالية:

$$a_{\mathrm{R}} = \frac{v^2}{r} \qquad (1-5)$$

وبالرغم من تغيّر اتجاه سرعة $\vec{\mathbf{v}}$ وتسارع $\vec{\mathbf{a}}_{\mathrm{R}}$ للجسم الخاضع للحركة الدائرية باستمرار، فإنّهما يظلّان متعامدين على بعضهما بعضًا في كلّ لحظة.

وهناك ضرورةٌ واضحةٌ لوجود محصّلة قوّة مؤثّرة لإبقاء الجسم في مدارٍ دائري، على أن يشير اتجاه هذه القوة إلى مركز الدائرة. وقد تكون هذه القوّة ناجةً من الجاذبيّة أو من الشدّ في الحبل، أو من مركبةٍ ما للقوّة العموديّة، أو لنوع قوّةٍ آخر، أو لمجموعة من هذه القوى.

[* وعندما تكون السرعة للحركة الدائرية غير ثابتة، يصبح للتسارع مركبتان، إحداهما مماسة والأخرى مركزية].

وينصّ **قانون نيوتن للجذب الكوني** على أنّ كلّ جسم في الكون يجذب كلّ جسمٍ آخر بقوّةٍ تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب كتلتيهما، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما، وفق المعادلة الآتية:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (4-5)$$

ويظهر اتجاه هذه القوّة على امتداد الخط الفاصل بين الجسمين. وهي القوّة نفسها التي ترغم القمر على الدوران حول الأرض، وكذلك الكواكب الأخرى السيارة على الدوران حول الشمس.

ومع أنّ الأقمار الصناعية تدور حول الأرض تحت تأثير الجاذبية الأرضية، فإنّ النصيحة للجميع هي أن "يبقوا يقظين" بسبب سرعة الأقمار الماسة الهائلة.

[*وتشكل قوانين نيوتن الثلاثة للحركة بالإضافة إلى قانون الجذب الكوني نظريةً واسعةً المدى عن الكون. فلقد أصبح من الممكن وصف الحركة بدقة متناهية للأجسام على الأرض، وكذلك للكواكب السيارة في الفضاء باستخدام هذه القوانين. وتوفر هذه القوانين الأساس النظري **لقوانين كبلر** لحركة الكواكب].

إنّ القوى الأربع الأساسية في الطبيعة، هي:

(1) قوّة الجاذبيّة. (2) القوى الكهرومغناطيسية. (3) القوة النووية الشديدة. (4) القوة النووية الضعيفة. وتُعدّ القوتان الأساسيتان الأولى والثانية مسؤولتين في الأغلب عن معظم القوى المؤثرة "اليومية".

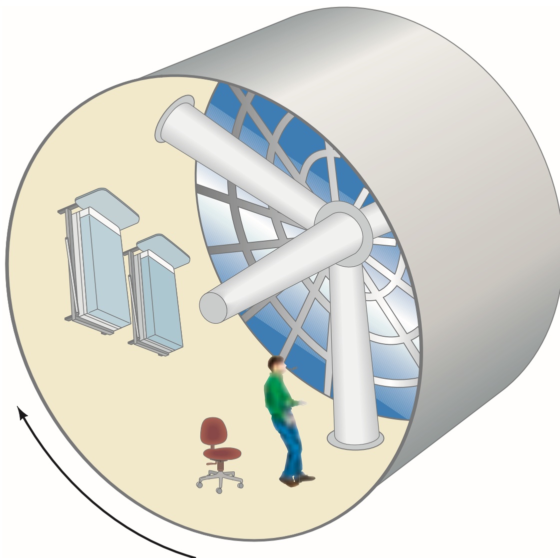
أسئلة

1. يقول بعض الناس أحيانًا بأنّ الماء قد أزيل عن الملابس في آلة تجفيف الثياب بوساطة القوّة المركزيّة عن طريق طرد المياه إلى الخارج. ما وجه الخطأ في هذه العبارة؟
2. هل يمكن اعتبار معدّل تسارع سيّارة حول منعطف تسير بسرعة ثابتة مقدارها 60 km/h هو المعدّل نفسه مقارنةً بالسيارة ذاتها عندما تتسارع حول منعطف أقلّ حدّة وبالسرعة السابقة الثابتة ذاتها؟ وضّح ذلك.
3. افرض أنّ هناك سيارةً تسير بسرعة ثابتة على طريق جبلي، حدّد أين ستؤثر هذه السيارة بأقصى قوة على الطريق خلال مسارها: (أ) عند أعلى التلة؟ أم (ب) عند السفح بين التلتين؟ أم (جـ) عند الأرض المنبسطة قرب أسفل التلة؟
4. صِفِ القوى المؤثرة جميعها في طفل يركب حصانًا خشبيًّا يتحرك على محيط دائرة في مدينة الألعاب. وما طبيعة القوة التي ستوفّر التسارع المركزي للطفل؟
5. من الممكن أن يتمّ التلويح بسرعةٍ بدلو مليء بالمياه في دائرة رأسية من غير أن تسكب المياه خارجه. وضّح ذلك.
6. ما عدد المسرعات في السيارة؟ هناك على الأقلّ ثلاث أدوات تنظم تسارع السيارة. فما هي؟ ما مقدار التسارع الذي تسببه كلّ منها؟
7. يسير طفل يركب مزلاجة بسرعةٍ عاليةٍ جدًّا فوق قمّة تلّة، كما في (الشّكل 5 – 31). ويشعر الطفل بتناقص القوة العمودية بين صدره والمزلاجة كلّما تسلّق التلة إلى الأعلى، بالرغم من أنّ مزلاجته لا ترتفع عن الأرض نهائيًّا، وتبقى ملتصقةً بها. فسّر تناقص القوّة بناءً على قانون نيوتن الثاني.



الشكل 5 – 31 (السؤال 7).

8. لماذا يتمايل سائقو الدراجات الهوائية إلى الداخل عندما يدورون حول المنعطفات بسرعات عالية؟
9. لماذا تميل الطائرات عندما تطير في مسار دائري؟ وكيف يمكنك حساب زاوية ميل الطائرة إذا علمت سرعتها ونصف قطر مسارها؟
10. تلوّح طفلة بكرة مثبتة بحبل في دائرة أفقية حول رأسها. فإذا أرادت الطفلة أن تترك الحبل من يدها عند لحظة ما، لتصطدم الكرة بهدفٍ محدّدٍ في طرف الملعب الآخر. فما اللحظة المناسبة التي يجب أن يُترَكَ الحبلُ عندها ؟
11. هل تستطيع التفاحة أن تؤثّر في الكرة الأرضية بقوة جذب ما؟ وكم تبلغ قيمة هذه القوة إذا كان هذا صحيحا؟ خذ بالحسبان تفاحة: (أ) معلقة على الشجرة. (ب) خلال سقوطها.
12. إذا تضاعفت كتلة الأرض مقارنةً بما هي عليه. فما التغيّرات التي ستطرأ على مدار القمر؟
13. ما الذي يجذب الآخر بقوّةٍ أكبر: الأرض للقمر أم القمر للأرض؟ وأيّهما يمتلك أعلى تسارع؟
14. يُعدّ جذب الشّمس للأرض أعلى من جذب القمر لها. ومع هذا فإنّ القمر هو المسؤول عن المدّ والجزر. فسر. (تنويه: افترض الفرق بين الجاذبية عند طرفي الكرة الأرضية).
15. هل يزن الجسم أكثر عند خط الاستواء أم عند قطبي الأرض؟ ما المؤثران الفاعلان؟ هل يعمل أحدهما ضد الآخر؟
16. إذا علمت أنّ قوة جاذبية الأرض للقمر تعادل نصف قوة جاذبية الشمس للقمر، فلماذا لم يتسبب ذلك بسحب القمر بعيدًا عن الأرض؟
17. هل يمكن اعتبار تسارع المريخ المركزي في مداره حول القمر أكبر من تسارع الأرض المركزي أم أصغر ؟
18. هل يتطلب الأمر سرعة أقل لإطلاق قمر صناعي: (أ) عند إطلاقه باتجاه الشرق؟ أم (ب) عند إطلاقه باتجاه الغرب؟ خذ بالحسبان اتجاه دوران الأرض.
19. يقرأ ميزان معلّق في مصعد يتحرّك إلى الأعلى وزنًا ظاهريًّا عندما يكون المصعد: (أ) يتسارع إلى الأسفل؟ أم (ب) يتسارع إلى الأعلى؟ أم (جـ) في حالة السقوط الحرّ؟ أم (د) يتحرّك إلى الأعلى بسرعة ثابتة؟ وفي أيّ حال سيكون الوزن أقلّ ما يمكن؟ أين سيظهر الميزان القراءة نفسها مقارنة بالوضع عند سطح الأرض؟
20. ما الذي يبقي القمر الاصطناعي في مداره حول الأرض؟
21. يتأثّر روّاد الفضاء الذين يقضون فتراتٍ طويلةً في الفضاء الخارجي سلبيًّا بظاهرة انعدام الوزن. وإحدى طرائق تمثيل الجاذبية هي تمثيل مركبة الفضاء على شكل قشرة أسطوانية دوّارة يسير على سطحها الداخلي روّاد الفضاء (الشّكل 5 – 23). فسّر كيف يمثّل ذلك الجاذبية الأرضية مع الأخذ بالحسبان: (أ) كيفية سقوط الأجسام. (ب) القوة التي نشعر بها على أقدامنا. (جـ) أيّ نواح أخرى للجاذبية من الممكن التفكير فيها.



الشكل 5 – 32 (السؤال 21 ومسألة 45).

22. فسّر كيف يشعر العدّاء "بالسّقوط الحرّ"، أو بانعدام وزنه الظاهري خلال خطواته.

* 23. تتحرك الأرض في شهر يناير بسرعة أعلى خلال مدارها حول الشمس مقارنةً بشهر يوليو. فهل تكون الأرض أقرب إلى الشمس خلال شهر يناير أم خلال شهر يوليو؟ وضّح ذلك. (ملحوظة: يُعدّ العامل المهم في تحديد الفصول هو ميل محور الأرض مقارنةً مع سطح مدارها).

* 24. لم تكن كتلة كوكب بلوتو معروفةً إلى أن تمّ اكتشاف قمره. فسّر كيف جعل اكتشاف القمر من تحديد كتلة بلوتو أمرًا ممكنًا؟

مسائل

5 – 1 إلى 5 – 3 الحركة الدائرية المنتظمة ومنحيات الطرق السريعة

1. (I) يتحرك طفلٌ يجلس على مسافة 1.10 m من مركز طاولة العجلة الدوارة بسرعة مقدارها 1.25 m/s. احسب ما يلي: (أ) التسارع المركزي للطفل. (ب) محصّلة القوّة الأفقية المؤثرة في الطفل (كتلة الطفل = 25.0 kg).

2. (I) تحلّق طائرة نفاثة بسرعة 1890 km/h (525 m/s) في مدار دائري نصف قطره 6.00 km. ما مقدار تسارعها بدلالة g؟

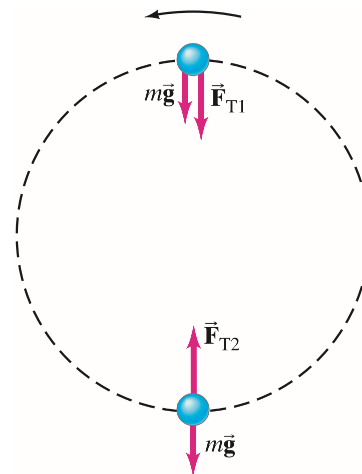
3. (I) احسب تسارع الأرض المركزي في مدارها حول الشمس ومحصّلة القوّة المؤثّرة فيها. ما الذي يؤثر بهذه القوة في الأرض. افرض أنّ مدار الأرض دائريّ ذو نصف قطر 1.50×10^{11} m. (تنويه: انظر الجدول داخل الغلاف الأمامي لهذا الكتاب).

4. (I) تؤثر قوة أفقية مقدارها 210 N في قرص كتلته 2.0 kg خلال دورانه المنتظم في دائرة أفقية نصف قطرها 0.90 m. احسب سرعة القرص.

5. (II) احسب التسارع المركزي لمكوك الفضاء في مداره حول الأرض إذا كان على ارتفاع 400 km فوق سطح الأرض ويمسح دورة كاملة حولها كلّ 90 دقيقة. عبّر عن الإجابة بدلالة عجلة الجاذبية الأرضيّة g عند سطح الأرض.

6. (II) ما تسارع قطعة معجون صغيرة ملتصقة بطرف عجلة صانع الفخار إذا كان قطر العجلة 32 cm، ومعدل دورانها 45 دورة في الدقيقة؟

7. (II) تدور كرةٌ مثبتةٌ في نهاية حبل بمعدل منتظم في دائرةٍ رأسيّةٍ نصف قطرها 72.0 cm، كما هو مبين في (الشّكل 5 – 33). إذا كانت سرعة الكرة 4.00 m/s وكتلتها 0.300 kg، فاحسب الشّدّ في الحبل إذا كانت الكرة عند: (أ) أعلى نقطة في مسارها. (ب) أخفض نقطة في المسار.



الشكل 5-33 (المسألة 7)

8. (II) تدور كرة كتلتها 0.45 kg مثبتة بنهاية حبل في دائرة نصف قطرها 1.3 m على سطح طاولة أفقي أملس. احسب أعلى سرعة تستطيع الكرة أن تصلها. إذا علمت أنّ الحبل سينقطع عندما يصبح الشّدّ فيه أعلى من 75 N؟

9. (II) ما أعلى سرعة تستطيع سيارة كتلتها 1050 kg أن تصلها وهي لا تزال تسير على طريق أفقي دائري نصف قطره 77 m. علمًا بأنّ معامل الاحتكاك السكوني بين سطح الطريق وعجلات السيارة هو 0.80 ؟ وهل تعتمد السرعة على كتلة السيارة؟

10. (II) ما مقدار معامل الاحتكاك السكوني بين سطح طريق دائري أفقي وعجلات السيارة إذا كانت سرعة السيارة 95 km/h ونصف قطر الطريق 85 m؟

11. (II) تمّ تصميم جهاز لتدريب روّاد الفضاء والطيارين الحربيين ليدور بهم في دوائر أفقية نصف قطرها 12.0 m. ما سرعة دوران المتدرّب إذا علمت أنّ القوّة التي يشعر بها على ظهره تعادل 7.85 ضعف وزنه؟ عبّر عن إجابتك بدلالة كلّ من: m/s و دورة/ث.

12. (II) وُضعت قطعةُ نقدٍ معدنيّة على بُعد 11.0 cm من محور دوران طاولة قادرة على الدوران بسرعات مختلفة. ما مقدار معامل الاحتكاك السكوني بين سطح الطاولة وقطعة النقد. إذا علمت أنه عند ازدياد سرعة دوران الطاولة تدريجيًّا بقيت القطعة المعدنيّة ساكنةً في مكانها إلى أن وصلت سرعة الدوران إلى 36 دورة/ دقيقة لتنزلق بعدها القطعة المعدنية بعيدًا عن موضعها على الطاولة؟

13. (II) ما أقلُّ سرعةٍ يجب أن تصلها عربة أفعوانية قبل أن يقع راكبوها عنها. وهي في الوضع المقلوب عند أعلى نقطة في مسار دائري نصف قطره 7.4 m كما هو موضح في (الشّكل 5 – 35)؟



الشّكل 5– 34 (المسألة 13)

14. (II). تمرّ سيارة رياضية كتلتها 950 kg (بما فيها السائق) عن قمة تلّة دائرية (نصف قطرها = 95 m) بسرعة 22 m/s. احسب ما يلي: (أ) القوة العمودية التي يؤثر بها الطريق في السيارة. (ب) القوة العمودية المؤثرة في السائق (ذي الكتلة 77 kg) من السيارة. (جـ) سرعة السيارة عندما تؤول القوة العمودية على السائق إلى الصفر.

15. (II) ما عدد الدورات الكاملة لكلّ دقيقة التي يجب أن يدورخلالها دولاب مدينة ألعاب قطره 15-m لكي يشعر الركاب بانعدام الوزن عند أعلى نقطة؟

16. (II) يُلفُّ دلوٌ كتلته 2.00 kg في دائرة عمودية نصف قطرها 1.10 m. إذا كانت قيمة الشّدّ في الحبل المثبت بالدلو عند أخفض نقطة في المسار 25.0 N: (أ) أوجد سرعة الدلو. (ب) ما سرعة الدلو اللازمة لكي يبقى الحبل مشدودًا عند أعلى نقطة في المسار الدائري؟

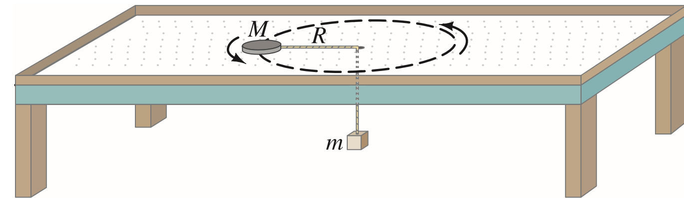
17. (II) ما مقدار السرعة اللازم لجهاز الطرد المركزي لكي يشعر جسم داخل الجهاز على بعد 9.00 cm من محور دورانه بتسارع قدره 115,000 g؟

18. (II) تلفُّ الغرفة الأسطوانية الدوّارة في مدينة الملاهي بالركاب لتصل إلى تردد 0.50 دورة/ث كما في (الشكل 5 – 35). فإذا تمّ سحب أرض الغرفة التي نصف قطرها 4.6 m عند ذلك التردد. فما أقلّ قيمة لمعامل الاحتكاك السكوني الذي يضمن عدم سقوط الرّكاب إلى الأسفل؟ وهل هناك قوة فعلية تضغط على الركاب باتّجاه جدران الغرفة لتمنعهم من السقوط كما يدّعون؟ وإذا كان الجواب لا. فما هو إذن الوصف الدقيق لوضع الركاب إضافة إلى خوفهم ؟ (تنويه: ارسم مخططًا حرًّا لشخص ما داخل الغرفة).



الشّكل 5 – 35 (المسألة 18).

19. (II) أثبت أنّ سرعة القرص الصلب المطاطي المستخدم في لعبة الهوكي الذي يتحرك في دائرة على سطح طاولة الهوكي الأملس هي $v = \sqrt{\frac{mgR}{M}}$ حيث M كتلة القرص، و m الكتلة المعلقة المثبتة بطرف الحبل أو المسبب لسرعة القرص على سطح الطاولة، كما هو مبين في (الشّكل 5 – 36).



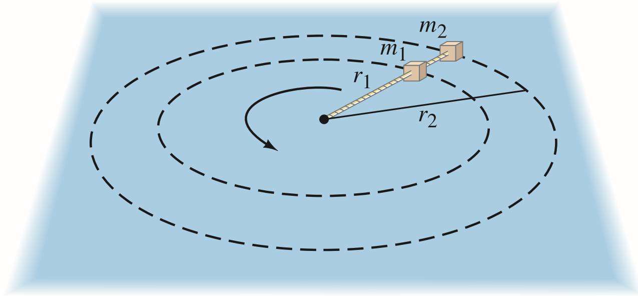
الشّكل 5–36 (المسألة 19).

20. (II) أعِدْ حلّ (المثال 5 – 3) بدقة تامة دون إهمال وزن الكرة الدوارة حول الحبل الذي طوله 0.600 m. ثمّ أوجد قيمة $\vec{F}_T$ والزاوية التي تصنعها مع الأفقي بدقة. وماذا تستطيع أن تستنتج عن المركبة العمودية لـ $\vec{F}_T$ باعتبار أنّ المركبة الأفقية لـ $\vec{F}_T$ تساوي ma_R وأنه لا توجد أيّ حركة عمودية ؟

21. (III) ما مقدار معامل الاحتكاك السكوني اللازم لمنع سيارة تسير بسرعة 95 km/h من الانزلاق على طريق دائري مائل نصف قطره 88 m تم تصميمه ليتلاءم مع سرعة قدرها 75 km/h تحديدًا؟

22. تدور سيارة كتلتها 1200-kg حول منعطف نصف قطره 67 m ويميل بزاوية 12° عن الأفقي. هل هناك ضرورة لوجود الاحتكاك إذا كانت سرعة السيارة تصل إلى 95 km/h ؟ وإذا كان الحل نعم. فما مقدار قوة الاحتكاك واتّجاهها؟

23. (III) ترتبط كتلتان m_1 و m_2 ببعضهما بعضًا. وكذلك بوتد مركزي بوساطة الحبال كما هو مبين في (الشكل 5 – 37). اشتق علاقة رياضية تمثّل الشدّ في كلّ جزء من الحبال عندما تدور كلٌّ من الكتلتين بتردد f (دورة لكلّ ثانية) على سطح أفقي أملس وعلى بعد r_1 و r_2 من الوتد على الترتيب.



الشّكل 5 – 37 (المسألة 23).

24. يعمل طيّارٌ مناورةً للهروب فيهبط بطائرته عموديًا إلى الأسفل بسرعة 310 m/s. فإذا كان الطيّار يتحمّل تسارعًا قدره 9.0 g's أضعاف تسارع الجاذبية الأرضية دون أن يُغمى عليه. فما مقدار الارتفاع الذي يجب أن يبدأ عنده بالخروج من المناورة كي لا يصطدم بالماء؟

* 5 – 4 الحركة الدائرية غير المنتظمة

25. * (I) حدّد مركبتي محصلة القوة (المماسة والمركزية) المؤثرة بوساطة الأرض في السيارة في (المثال 5 – 8). افرض أنّ كتلة السيارة 1100 kg وسرعتها 15 m/s.

26. * (II) تتسارع سيارة من السكون إلى سرعة 320 km/s خلال منعطف شبه دائري نصف قطره 220 m. حدّد المركبتين المماسة والمركزية لتسارع السيارة في منتصف المنعطف عند ثبات المركبة المماسة. وما مقدار معامل الاحتكاك السكوني بين عجلات السيارة وسطح الطريق الذي سيمنع السيارة من الانزلاق عند حركتها بالتسارع نفسه على المنحنى لو كان أفقيًا تمامًا.

27. * (III) يدور جسمٌ في دائرة أفقية نصف قطرها 2.90 m. ويصل تسارع الجسم عند لحظة ما إلى 1.05 m/s² عندما يكون مشيرًا باتّجاه يصنع زاوية مقدارها 32.0° مع اتّجاه الحركة. حدّد سرعة الجسم: (أ) عند تلك اللحظة. (ب) بعد 2.00 s وعند ثبات التسارع المماس.

5 – 6 و 5 – 7 قانون الجذب الكوني

28. (I) احسب قوّة جذب الأرض لمركبة فضاء كتلتها 1350 kg تقع على بعد 12,800 km (يكافئ قطر الأرض) فوق سطح الأرض.

29. (I) يعادل تسارع الجاذبية على سطح كوكب ما 12.0 m/s². فإذا تمّ نقل كرة نحاسية كتلتها 21.0-kg إلى سطح هذا الكوكب. فاحسب: (أ) كتلة الكرة على كلّ من الأرض والكوكب. (ب) وزن الكرة على كلّ من الأرض والكوكب.

30. (II) احسب تسارع الجاذبية على سطح القمر إذا علمت أنّ كتلة القمر 7.35×10^{22} kg ونصف قطره 1.74×10^{6} m.

31. (II) ما تسارع الجاذبية بالقرب من سطح كوكب افتراضي نصف قطره 1.5 ضعف نصف قطر الأرض، وله كتلة الأرض نفسها ؟

32. (II) ما قيمة g قرب سطح كوكب افتراضي كتلته تعادل 1.66 ضعف كتلة الأرض، وله نصف قطرالأرض نفسه ؟

33. (II) إذا تجاذب جسمان بقوة مقدارها 2.5×10^{-10} N عندما تكون المسافة بينهما 0.25 m. فأوجد كتلة كلٍّ منهما إذا كان مجموع كتلتيهما 4.0 kg.

34. (II) احسب مقدار g الفاعل (تسارع الجاذبية) عند: (أ) 3200 m. (ب) 3200 km فوق سطح الأرض.

35. (II) ما مقدار المسافة الفاصلة بين مركز الأرض ونقطة خارج الأرض تكون عندها الجاذبية الناتجة من الأرض $\frac{1}{10}$ قيمتها عند سطح الأرض؟

36. (II) احسب تسارع الجاذبية عند سطح نجم نيوتروني كتلته 5 أضعاف كتلة شمسنا، وشكله كروي نصف قطره حوالي 10 km.

37. (II) ما تسارع الجاذبية على سطح نجم أبيض يكاد يكتمل تطوره إذا كان حجمه الحالي صغيرًا كحجم قمرنا، وكتلته كبيرة تعادل كتلة شمسنا، علما بأنّ حجمه كان في يوم ما كحجم شمسنا؟

38. (II) وأنت تحاول تفسير ظاهرة انعدام الوزن الذي يشعر به روّاد الفضاء عندما يكون مكوك الفضاء في مداره، علّق بعض أصدقائك بأنّ الجاذبية تصبح ضعيفة جدّا عند ذلك الارتفاع. حاول اقناع نفسك وأصدقائك بأنّ الأمر مختلف تمامًا، وذلك عن طريق حساب تسارع الجاذبية الأرضية بدلالة g عند ارتفاع 250 km فوق سطح الأرض.

39. (II) تقع أربع كرات كتلة كلّ منها 9.5-kg على زوايا مربع طول ضلعه 0.60 m. احسب مقدار قوة التجاذب الكليّة واتجاهها لكلّ كرة من الكرات الثلاث الأخرى.

40. (II) تصطف معظم الكواكب في خطٍّ واحدٍ على جانبٍ واحدٍ من الشمس مرّةً واحدةً على الأقل كلّ حوالي عدة مئات من السنوات . احسب محصلة القوى الكلية المؤثرة في كوكب الأرض من كلّ من الزهرة والمشتري وزحل، عندما تكون الكواكب الأربعة مصطفة في خطّ واحد، كما في (الشكل 5 – 38). افرض أنّ كتلة كلّ منها كما يلي: كتلة الزهرة = 0.815 كتلة الأرض، وكتلة المشتري = 318 كتلة الأرض، و كتلة زحل = 95.1 كتلة الأرض. ومتوسط المسافات التي تفصلها عن الشمس هي: 108، و 150، و 778، و 1430 مليون km بالترتيب. ما مقدار هذه القوة بالنسبة إلى قوة الشمس على الأرض؟



الشكل 5 – 38 (المسألة 40). (لا يعكس الشكل الأبعاد الحقيقية)

41. (II) إذا علمت أن تسارع الجاذبية بجوار سطح كوكب المريخ 0.38 من تسارع الجاذبية عند سطح الأرض، فحدّد كتلة كوكب المريخ، علمًا بأن نصف قطره 3400 km.

42. (II) حدّد كتلة الشمس بدلالة زمن الدورة الواحدة للأرض حول الشمس وبعد الأرض عن الشمس. (ملحوظة: قارن إجابتك بتلك الناتجة من استخدام قوانين كبلر، كما في المثال 5 – 16).

5 – 8 الأقمار الصناعية وانعدام الوزن

43. (I) احسب سرعة قمر صناعي يتحرك في مدار دائري حول الأرض على ارتفاع 3600 km.

44. (I) ما السرعة اللازمة لمكوك الفضاء (بالنسبة إلى الأرض) كي يستطيع أن يطلق قمرًا صناعيًّا قادرًا على البقاء في مدار دائري على بعد 650 km من سطح الأرض؟

45. (II) ما معدّل الدوران المطلوب لمركبةِ فضاءٍ أسطوانيّة الشّكل كي يشعر من بداخلها بتسارع جاذبية يعادل 0.6 g؟ افرض أنّ قطر مركبة الفضاء 32 m. واعط إجابتك بدلالة الزمن اللازم لدورة واحدة كاملة. (انظر السؤال 12، الشكل 5 – 23).

46. (II) حدّد الزمن اللازم لقمر صناعي كي يدور حول الأرض في مدار دائري قريب من سطح الأرض. يُعرف القرب من سطح الأرض على أنه ارتفاع ضئيل مقارنةً مع نصف قطرها. وهل تعتقد أنّ الإجابة النهائية ستعتمد على كتلة القمر الصناعي؟

47. (II) ما مقدار السرعة الأفقية اللازمة لإطلاق قمر صناعي من سطح قمة جبل إيفريست ليستقر في مدار دائري حول الأرض؟

48. (II) لقد بقيت مركبة القيادة تدور حول القمر خلال مهمّة النزول على سطح القمر عند ارتفاع يقارب 100 km. ما الزمن اللازم للدوران حول القمر دورة واحدة كاملة؟

49. (II) تتكون حلقات كوكب زحل من كتل ثلجية تدور حوله . ويبلغ طول نصف قطر الحلقة الداخلي 73,000 km، في حين يتراوح طول نصف قطر الحلقة الخارجي حوالي 170,000 km. أوجد زمن الدورة الواحدة لقطعة من هذه الكتل الثلجية عند نصف قطرها الداخلي، وكذلك عند نصف قطرها الخارجي، ثمّ قارن هذين الزمنين مع متوسط زمن الدورة الواحدة لكوكب زحل الذي يعادل 10 ساعات و 39 دقيقة. افرض أنّ كتلة كوكب زحل 5.7×10^{26} kg.

50. (II) إذا مسح دولاب ألعاب قطره 24.0 m دورة كاملة خلال 15.5 s (الشّكل 5 – 9). فما نسبة الوزن الظاهري لشخص ما مقارنة مع وزنه الحقيقي عندما يجلس عند: (أ) قمة الدولاب. (ب) أسفل الدولاب.

51. (II) ما الوزن الظاهري لرائد فضاء كتلته 75-kg عندما يجلس في عربة الفضاءعلى بعد 4200 km من مركز قمرنا عندما: (أ) تسير العربة بسرعة ثابتة؟ (ب) تتسارع العربة باتجاه القمر بمعدل $2.9\ m/s^2$؟ حدّد الاتجاه في كلّ حالة.

52. (II) افرض أنّ هناك نظامًا زوجيًّا نجميًّا يتكون من نجمين متساويين بالكتلة، ويبتعدان عن بعضهما بعضًا مسافة 360 مليون km. احسب مقدار كتلة كلٍّ منهما إذا علمت أنهما يحتاجان إلى فترة 5.7 سنة من سنوات الأرض للدوران حول نقطة في منتصف المسافة بينهما؟

53. (II) ما قراءة الميزان الزنبركي داخل مصعد إذا وقفت فوقه امرأة كتلتها 55-kg وهو يتحرك: (أ) صاعدًا بسرعة ثابتة مقدارها 6.0 m/s؟ (ب) هابطًا بسرعة ثابتة مقدارها 6.0 m/s؟ (جـ) صاعدًا بتسارع مقداره 0.33 g؟ (د) هابطًا بتسارع قدره 0.33 g؟ (هـ) خلال سقوط حرّ؟

54. (II) يتعلق شمبانزي كتلته 17.0-kg بحبل معلّق في سقف مصعد بحيث يتحمّل الحبل قوّة شدٍّ عظمى مقدارها 220 N. ما أقل قيمة ممكنة لتسارع المصعد مقدارًا واتجاهًا التي سينقطع عندها الحبل؟

55. (II) (أ) اثبت أنّ قيمة كثافة كوكب (كتلته / حجمه) هي: $\rho = m/V = 3\pi/GT^2$ وهي مُعَرَّفة بدلالة القمر الصناعي الذي يدور حوله، وقريبًا من سطحه بزمن دوري قدره T. (ب) قدّر كثافة كوكبنا (الأرض) إذا علمت أنّ الزمن الدوري لقمر صناعي يدور حولها قريبا من سطحها حوالي 85 دقيقة.

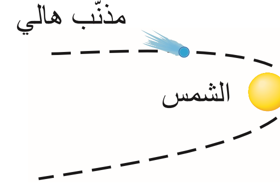
* 5 – 9 قوانين كبلر

* 56. (I) استخدم قوانين كبلر وزمن القمر الدوري (27.4 d) لتحديد الزمن الدوري لقمر صناعي يدور قريبًا جدّا من سطح الأرض.

* 57. (I) ما متوسط بعد الجرم السماوي آيكاروس عن الشمس، الذي يدور حولها بزمن دوري قدره 410 أيام، علمًا بأنّ طوله لا يتعدّى عدّة مئاتٍ من الأمتار.

* **58.** متوسط بُعد كوكب نبتون عن الشمس 4.5×10^9 km. قدّر طول السنة النبتونية إذا علمت أنّ متوسط بُعد الأرض عن الشمس 1.50×10^8 km.

* **59.** (II) يحتاج مُذَنَّبُ هالي إلى 76 يومًا للدوران حول الشمس دورة كاملة. وهو يقترب كثيرًا من سطح الشمس لفترةٍ خلال مساره (الشكل 5 – 39). قدّر طول أبعد مسافة للمذنّب عن الشمس.



الشّكل 5 – 39 (المسألة 59).

* **60.** (II) تدور شمسنا حول مركز مجرتنا ($M_G \approx 4 \times 10^{41}$ kg) على بعد حوالي 3×10^4 سنة ضوئية ($1\text{ ly} = 3 \times 10^8\text{ m/s} \times 3.16 \times 10^7\text{ s/y} \times 1\text{ y}$). ما الزمن الدوري الناتج من حركة دوراننا حول مركز المجرة؟

* **61.** (II) يبين (الجدول 5 – 3) الكتل، والزمن الدوري، ومتوسط المسافة لأكبر أربعة أقمار تابعة لكوكب المشتري، والتي اكتشفها جاليليو سنة 1609. (أ) حدّد كتلة المشتري باستخدام بيانات القمر "أيو". (ب) حدّد كتلة كوكب المشتري باستخدام بيانات الأقمار الثلاثة الأخرى. وهل البيانات متوافقة؟

الجدول 5 – 3 أقمار المشتري الرّئيسة

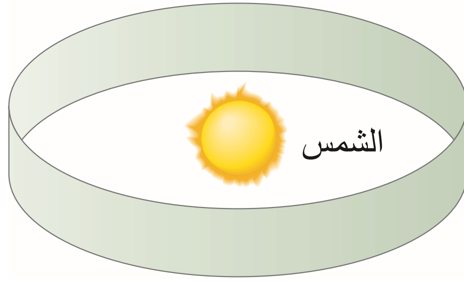
القمر	الكتلة (kg)	الزّمن الدوري (أيام الأرض)	متوسط المسافة من المشتري (km)
آيو	8.9×10^{22}	1.77	422×10^3
أوروبا	4.9×10^{22}	3.55	671×10^3
جانيميد	15×10^{22}	7.16	1070×10^3
كالستو	11×10^{22}	16.7	1883×10^3

* **62.** (I) حدّد كتلة الأرض من الزمن الدوري والمسافة المعروفين للقمر.

* **63.** (II) حدّد متوسط بُعد كوكب المشتري عن كلّ من أقماره باستخدام قانون كبلر الثالث. استخدم بُعد القمر "أيو" والأزمان الدورية المبينة في (الجدول 5 – 3). وقارن النتائج مع القيم في الجدول.

* **64.** (II) يتكون حزام الأجرام السماوية بين كوكبي المريخ والمشتري من عدد كبير من الشظايا، والذي يعتقد بعض علماء الفضاء أنها كانت جزءًا من كوكب كان يدور حول الشمس قبل أن يُدمّر. (أ) إذا كان مركز ثقل حزام الأجرام (حيث يُفترض موضع الكوكب قبل دماره) يبتعد عن الشمس ثلاثة أضعاف بُعد الأرض عنها، فما الزمن الدوري لهذا الكوكب الافتراضي؟ (ب) استخدم هذه البيانات لاستنتاج كتلة هذا الكوكب؟

* **65.** (III) تصف قصّةٌ مبنيّةٌ على الخيال العلمي "كوكبًا" صناعيًا على شكل حزمة تطوق الشمس تمامًا. ويعيش سكان هذا الكوكب على سطحه الداخلي حيث يكون الوقت ظهرًا طوال الوقت (الشكل 5 – 40). لو افترضنا أنّ هذه الشمس مثل شمسنا، وأنّ المسافة بينها وبين الحزمة كالمسافة بين أرضنا وشمسنا (لكي يكون الطقس معتدلًا)، وأنّ الحلقة تدور بسرعة كافية لتوليد جاذبية g كتلك التي على أرضنا، فما هو إذن الزمن الدوري أو سنة هذا الكوكب بدلالة الأيام على الأرض؟



الشّكل 5 – 40 (المسألة 65).

مسائل عامة.

66. يخطّط طرزان لعبور فلج عن طريق التأرجح على شكل قوس باستخدام ساق شجرة معلقة (الشّكل 5 – 14). إذا كانت ذراعاه قادرتين على بذل قوة مقدارها 1400 N على ساق الشجرة، فما السرعة العظمى التي يستطيع أن يتحملها طرزان عند أخفض نقطة خلال تأرجحه؟ افرض أنّ كتلة طرزان 80 kg وطول ساق الشجرة 5.5 m.



الشّكل 5 – 41 (المسألة 66).

67. عند أيّ ارتفاع فوق سطح الأرض يكون تسارع الجاذبية مساويًا لنصف قيمته عند سطح الأرض؟

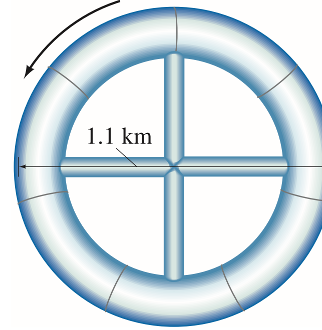
68. تمسك متزلجتان على الجليد بأيدي بعضهما بعضًا داخل قاعة التزلّج وتبدآن بمسح دائرة مشتركة بزمن دوري قدره 2.5 s. ما شدَّة جذبهما لبعضهما بعضًا، علمًا بأنّ طول ذراع كلٍّ منهما 0.80 m وكتلة كلٍّ منهما 60.0 kg؟

69. سيقلّ تسارع الجاذبية الظاهري عند خط الاستواء قليلًا عن القيمة الافتراضية لو أنّ الأرض ثابتةً لا تدور، علمًا بأنّ الأرض تنهي دورة كاملة كلّ يوم. اعطِ قيمةً تقديريّةً للتسارع الظاهري بدلالة g.

70. ما المسافة التي تبعدها سفينة فضاء عن الأرض خلال سفرها مباشرةً من الأرض إلى القمر، والتي تصبح عندها محصّلة القوى على السفينة صفرًا نتيجة لتساوي قوّة جذب كلٍّ من الأرض والقمر للسفينة؟

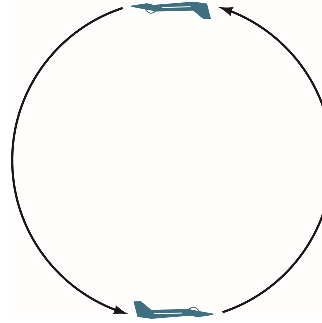
71. إذا كنت مُتيقّنًا من أنّ كتلتك 65 kg. ومع هذا فإنّ قراءة الميزان في المصعد تشير إلى 82 kg. فما تسارع المصعد؟ وفي أيّ اتجاه؟

72. تتكوّن محطّة فضاءٍ مُفترضة من أنبوب دائري قادر على الدوران حول محوره المركزي (مثل عجل الدراجة) (الشكل 5 – 42) . إذا كان نصف قطر الأنبوب الدائري حوالي $1.1\ km$. فما سرعة الدوران الضرورية (دورة لكلّ يوم) اللازمة لتوليد تسارع جاذبية عند السطح يعادل $1.0\ g$؟



الشّكل 5 – 42
(المسألة 72)

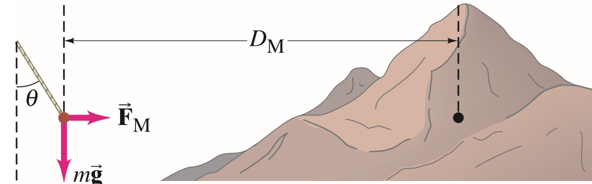
73. يقود طيّار طائرة نفاثة في دائرة عمودية (الشّكل 5 – 43): (أ) حدّد أصغر نصف قطر دائرة إذا كانت سرعة النفاثة $1300\ km/h$. شرط ألا يتجاوز تسارعها المركزي $6.0\ g$ عند أخفض نقطة في المسار. واحسب الوزن الفاعل للطيار ذي الكتلة 78-kg (القوة العمودية إلى الأعلى على الطيار في مقعده عند: (ب) اخفض نقطة في المسار. (جـ) أعلى نقطة في المسار (افترض السرعة نفسها).



الشّكل 5 – 43
(المسألة 73)

74. أوجد معادلةً لكتلة كوكب بدلالة نصف قطره وتسارع الجاذبية عند سطحه g_P وثابت الجذب الكوني G.

75. تميل كتلة m معلقة بحبل عن الرأسي بزاوية θ نتيجة لوجودها بقرب جبل شاهق (الشكل 5 – 44). (أ) أوجد معادلة تقريبية للزاوية θ بدلالة كلٍّ من كتلة الجبل m_M، والمسافة إلى مركزه D_M، ونصف قطر الأرض وكتلتها. (ب) اعط قيمةً تقريبية لكتلة جبل إيفريست. مفترضًا أنّ شكله مخروطي، ويرتفع $4000\ m$ بقطر يقارب $4000\ m$. افرض أنّ كتلة وحدة الحجوم $3000\ kg/m^3$. (جـ) قدّر قيمة الزاوية θ إذا كانت الكتلة تبعد مسافة $5\ km$ عن مركز جبل إيفريست.



الشّكل 5 – 44 (المسألة 75).

76. صمّم منعطفًا مائلًا نصف قطره $67\ m$ يسمح بسرعة قصوى مقدارها $95\ km/h$. ما السرعات التي يمكن لسيارة أن تختبرها بأمان وهي تدخل هذا المنعطف. علمًا بأنّ معامل الاحتكاك السكوني 0.30؟

77. كيف سيصبح طول اليوم إذا كانت سرعة دوران الأرض تجعل الأجسام عند خط الاستواء عديمة الوزن؟

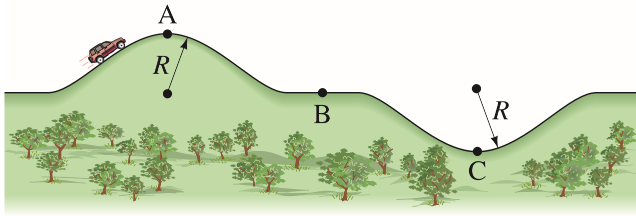
78. يحافظ نجمان متساويان بالكتلة على المسافة الفاصلة بينهما ثابتة عند $8.0 \times 10^{10}\ m$. ويدوران حول نقطة تقع في منتصف المسافة بينهما بمعدّل دورةٍ واحدة كلّ 12.6 سنة. (أ) لماذا لا يصطدم النجمان ببعضهما نتيجة قوة التجاذب بينهما؟ (ب) ما كتلة كلّ منهما؟

79. ما سرعة القطار الثابتة التي عبر فيها منعطفًا نصف قطره $235\ m$ إذا علمت أنّ المصباح المعلّق في القطار مال بزاوية $17.5°$ طوال فترة العبور؟

80. تبلغ كتلة المشتري 320 ضعف كتلة الأرض. ويُقال بناءً على ذلك بأنّ أيّ شخص يقف فوق ذلك الكوكب سيسحق. ولن يتحمل قوة جاذبية المشتري. احسب مقدار هذه الجاذبية فوق سطح المشتري وعند خط استوائه. ثمّ قارن النتيجة مع g. استخدم البيانات التالية الخاصة بكوكب المشتري: الكتلة $= 1.9 \times 10^{27}\ kg$. ونصف القطر عند خط الاستواء$= 7.1 \times 10^4\ km$. والزمن الدوري $= 9$ ساعات و 55 دقيقة. ملحوظة: لا تهمل التسارع المركزي.

81. استنتج علماء الفلك عند استخدامهم مرصد "هبل" الفضائي وجود لبّ ثقيل جدّا في المجرة البعيدة M87 وكثيف لدرجة أنه من الممكن أن يكون ثقبًا أسود؛ حيث لن يستطيع أيّ ضوء الهروب منه. وكان هذا الاستنتاج مبنيًّا على قياسهم لسرعة سحب الغاز التي تلفّ حول اللبّ بسرعة $780\ km/s$ وعلى بعد 60 سنة ضوئية$(5.7 \times 10^{17}\ m)$ من اللب. استنتج كتلة اللب. وقارن النتيجة مع كتلة شمسنا.

82. تحافظ سيارة على سرعتها الثابتة v وهي تقطع الطريق. كما هو في (الشّكل 5 – 45). فإذا كان نصف قطر كلّ من التلة والوادي هو R: (أ) قارن بين القوة العمودية عند كلّ من النقاط أ، و ب، و ج من حيث الأكبر والأصغر. وضّح إجابتك. (ب) عند أيّ موضع سيشعر السائق بأعلى وزن ظاهري؟ وعند أيّ موضع سيشعر بأقلّ وزن ظاهريّ؟ وضّح إجابتك. (جـ) ما أعلى سرعة يستطيع السائق الوصول إليها عند النقطة أ قبل أن ترتفع عجلات سيارته عن سطح الطريق؟



الشّكل 5 – 45 (المسألة 85).

83. يستخدم نظام تحديد المواقع العالمي (نافستار) مجموعة من 24 قمرًا صناعيًّا تدور حول الأرض. ويمكن تحديد موقع جهاز الاستقبال على الأرض بدقة متناهية تصل إلى عدة سنتيمترات باستخدام "نظام التثليث" والإشارات المرسلة من الأقمار الصناعية. ولقد تم توزيع الأقمار الصناعية على نحو متساوٍ حول الأرض ليكون هناك أربعة أقمار في كلّ مدار من المدارات الستة كي يسمح هذا التوزيع بالتعديلات الملاحية المستمرة. وتدور الأقمار على ارتفاعات تقارب 11,000 ميل بحري (الميل البحري $= 1.852\ km = 6076$ قدم). (أ) حدّد سرعة كلّ من الأقمار الصناعية. (ب) حدّد الزمن الدوري لكلّ قمر صناعيّ.

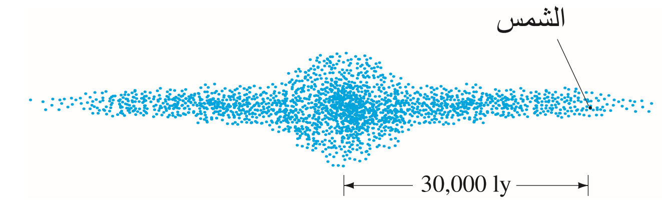
84. بدأ الجرم السّماوي "رينديزفوس" بالدوران حول الجرم السّماوي "إروس" على ارتفاع 15 km بعد أن قطع مسافة 2.1 مليار km، علمًا بأنّ أبعاد "إروس" هي 40 km × 6 km × 6 km، وكثافته (كتلة/حجم) تقارب $2.3 \times 10^3\ kg/m^3$. (أ) ما زمن "رينديزفوس" الدوري نسبةً إلى "إروس"؟ (ب) ما نصف قطر "إروس" إذا كان شكله كرويًّا، وله الأبعاد والكثافة نفسها كما ورد أعلاه؟ (جـ) ما قيمة g على سطح "إروس" الكروي؟

85. يجلس رائد الفضاء في مكوك الفضاء منتظرًا الوقت المناسب ليبدأ بإصلاح قمر صناعي. فإذا كان المكوك يدور في مدار القمر الصناعي نفسه (400 km فوق الأرض) ومتأخرًا عنه مسافة 25 km، فما: (أ) الفترة الزمنية اللازمة لوصول المكوك إلى موضع القمر إذا خطط رائد الفضاء إلى إنقاص نصف قطر مدار المكوك بمقدار 1.0 km؟ (ب) مقدار التغير في نصف قطر مدار المكوك إذا خطط رائد الفضاء أن يصل إلى القمر بعد 7 ساعات فقط؟

* **86.** إذا كان الزمن الدوري لمذنب هالي – بوب 3000 سنة فما: (أ) متوسط بعده عن الشمس؟ (ب) أقرب موضع لطرف المذنب البعيد عن الشمس بدلالة "AU" (علمًا بأنّ 1AU متوسطُ المسافة بين الأرض والشمس)؟ (جـ) قيمة السرعة عند أبعد نقطة؟ (تنويه: استخدم قانون كبلر الثاني وقدّر المساحات باستخدام مثلث (كما في الشكل 5 – 29 وانظر أيضا إلى مسألة 59).

87. قدّر قيمة G الضرورية لكي تشعر بالانجذاب إلى شخص آخر يجلس بجوارك. استخدم فرضيات منطقية، مثل: $F \approx 1\ N$.

* **88.** تدور الشمس حول مركز مجرة درب التبانة (الشّكل 5 – 46) على بعد 30،000 سنة ضوئية من المركز (السنة الضوئية = $9.5 \times 10^{15}\ m$). احسب كتلة مجرتنا إذا استغرق زمن الدورة الواحدة 200 مليون سنة. افرض أنّ توزيع كتلة المجرة يتركز على هيئة كرة مركزية منتظمة على الأغلب. يبلغ عدد النجوم في مجرتنا إذا كانت النجوم جميعها لها كتلة شمسنا نفسها ($2 \times 10^{30}\ kg$) تقريبا؟



الشّكل 5 – 46 (المسألة 88). منظر جانبي لمجرتنا.

89. أوجد مقدار قوّة الجذب واتّجاهها على كتلة مقدارها 1.0-kg وضعت في منتصف الضلع السفلي لمربع طول ضلعه 0.50 m، وتتركز كتلة مقدارها 1.0-kg على كلّ زاوية من زواياه الأربع.

90. يدور قمر صناعي كتلته 5500 kg حول الأرض (كتلة الأرض = $6.0 \times 10^{24}\ kg$) وزمنه الدوري 6200 s. أوجد كلّا من: (أ) قيمة قوة جذب الأرض للقمر الصناعي. (ب) ارتفاع القمر.

91. ما التسارع الذي يشعر به رأس عقرب الثواني الذي طوله 1.5-cm في ساعة اليد؟

92. إذا حركت ثقل حبل الصيد الغاطس لتمسح دوائر في الماء لشعورك ببعض الملل وأنت تصطاد السمك، وإذا كان طول الحبل هو 0.25-m والزمن الدوري 0.50 s، فما الزاوية التي يصنعها حبل الصيد مع الرأسي؟ (تنويه: انظر إلى الشّكل 5 – 10).

93. لقد تم تصميم منعطف دائريّ نصف قطره R على طريق سريع جديد بحيث تستطيع السيارة أن تعبره كاملا بسرعة v_0 بأمان على سطح مغطى بالثلج، وعليه، فإذا تحركت السيارة ببطء شديد، فإنها ستنزلق باتّجاه مركز الدائرة، وإذا كانت مسرعة جدًّا، فستقذف في الاتجاه الآخر خارج مركز الدائرة. وإذا ازدادت قيمة معامل الاحتكاك السكوني فستبقى السيارة تتحرك على الطريق طالما ظلت سرعتها محصورة بين قيمة دنيا للسرعة v_{max}، وقيمة عليا v_{max}. اشتق معادلات لكلّ من: v_{max}، و v_{max} بدلالة كلّ من: μ_s، و v_0، و R.

94. يستخدم القطار السريع "آمتراك – أسيلا" طريقة ميل العربات خلال انعطافه، ويتم تعديل زاوية الميل بحيث تصبح القوة الرأسية هي القوة الرئيسة المؤثرة في الركاب التي توفر القوة المركزية. ويشعر الركاب بالراحة أكثر نتيجة لذلك عندما تتناقص قوة احتكاكهم مع المقاعد. افرض أنّ هذا القطار سيسير في منعطف نصف قطره 620 m بسرعة 160 km/h (100 mi/h). احسب كلّا من: (أ) قوة الاحتكاك الضرورية لراكب كتلته 75 kg عندما لا تكون السكة مائلة ويكون القطار مستويا. (ب) مقدار قوة الاحتكاك على الراكب إذا مال القطار إلى أقصى درجة ممكنة $8.0°$ باتّجاه مركز المنعطف.

إجابات التمارين

أ: المعامل 2 (يتضاعف).
ب: لا تعتمد السرعة على كتلة الملابس.
جـ: (أ).
د: لا.
هـ: نعم.
و: (أ) لا يحدث أيّ تغيير. (ب) أربع مرات أكبر.
ز: (ب).



يكاد لاعب كرة (القاعدة) البيسبول أن يُسرّع الكرة بقوة يده ليكسبها سرعة متجهة عالية بدءًا من السكون. وهو بذلك يبذل شغلا على الكرة ينجم عنه إزاحتها مسافة عدة أمتار تبدأ من خلف رأسه لتنتهي عندما يترك الكرة، ويده ممتدة نحو الأمام إلى أقصى مسافة ممكنة. وبهذا يصبح الشّغل المبذول على الكرة معادلًا لطاقتها الحركيّة المكتسبة ($\frac{1}{2}mv^2$)؛ وهذا هو مبدأ الشّغل والطّاقة.

الفصل 6

الشّغل والطّاقة

لقد درسنا حتى الآن حركة الأجسام الانتقالية بدلالة قوانين نيوتن الثلاثة للحركة. وبناءً على التحليل السابق، فإنّ القوة ككمية متجهة تكون قد أدّت الدور الأساس في تحديد الحركة. وسنتناول في الفصلين الحالي والذي يليه طريقة مختلفة لتحليل حركة الأجسام الانتقالية باستخدام الكميتين القياسيتين: الشغل والطاقة. حيث تكمن أهميتهما في إمكانية حفظهما لتبقى كلّ منهما ثابتة تحت الظروف المعيارية. كما تمنحنا هاتان الكميتان المحفوظتان فرصة للتمعن في طبيعة العالم من حولنا، وتوفران لنا طريقة منهجية لحلّ المسائل العملية.

اكتسب قانونا حفظ الطاقة والزخم الخطيّ أهمية واسعة؛ لسهولة تطبيقهما عند التعامل مع الأنظمة متعددة الأجسام، وخاصة عندما يكون التعامل مع القوة المسببة للحركة صعبًا أو مستحيلا. كما تجدر الإشارة هنا إلى إمكانية استخدام هذين القانونين أيضًا في مجالات الفيزياء المتعددة الأخرى، والذي من ضمنها علم الفيزياء الذرية بفروعه المختلفة، وتحديدًا عند تعذّر استخدام قوانين نيوتن للحركة؛ لعدم صلاحيتها تحت تأثير تلك الظروف.

لقد تمّ تكريس هذا الفصل للحديث عن مبدأين مهمين في الفيزياء، هما: الشغل والطاقة. ويُعدّ التعامل مع هاتين الكميتين القياسيتين أمرا يسيرا، ولا يحتاج إلى عمليات رياضية معقدة أو متطورة؛ نظرًا إلى عدم ارتباطهما بأيّ اتجاه مقارنةً مع الكميات المتجهة.

1-6 الشّغل المبذول بواسطة قوة ثابتة

الشّغل

على الرّغم من ارتباط كلمة شغل بأكثر من معنى في حياتنا اليومية، فإنّ لها معنًى خاصًّا ومُحدّدًا في الفيزياء. ولقد تمّ تعريف مصطلح الشغل في الفيزياء ليصف تأثير القوة الخارجية الثابتة مقدارًا واتجاهًا المؤثرة في جسم ما، والتي ينجم عنها إزاحة هذا الجسم عن موضعه الأصلي. ونستطيع التعبير عن ذلك رياضيًّا كالتالي:

$$W = F_{\parallel} d$$

حيث $F_{\parallel}$ هي مركبة القوة الثابتة $\vec{\mathbf{F}}$ الموازية للإزاحة $\vec{\mathbf{d}}$.

كما يمكننا التعبير عن المعادلة السابقة كالتالي:

تعريف الشغل (للقوة الثابتة)

$$W = Fd\cos\theta \qquad \mathbf{(1-6)}$$

حيث F هي مقدار القوة الثابتة، و d هي مقدار إزاحة الجسم، أما θ فهي الزاوية المحصورة بين اتجاهي القوة والإزاحة (انظر الشّكل $6-1$). وبمقارنة المعادلتين السابقتين نستنتج أنّ $F\cos\theta\,(=F_{\parallel})$ هي المركبة $\vec{\mathbf{F}}$ الموازية للإزاحة $\vec{\mathbf{d}}$. حيث إن الشغل كمية عددية لها مقدار قد يكون سالب أو موجب.

وعندما يكون اتجاه القوة موازيًا تمامًا لاتجاه إزاحة الجسم، فإنّ الزاوية المحصورة بينهما تساوي صفرًا. وعليه، فإنّ: $\cos\theta = 1$، ويمكن إعادة صياغة معادلة $(1-6)$ لتكتب كما يلي: $W = Fd$. وعلى سبيل المثال، فعند دفع عربة مليئة بالمشتريات مسافة 50 m بواسطة قوة أفقية ثابتة مقدارها 30 N، فسيكون الشغل المبذول على العربة هو $30\text{ N} \times 50\text{ m} = 1500\text{ N}\cdot\text{m}$.

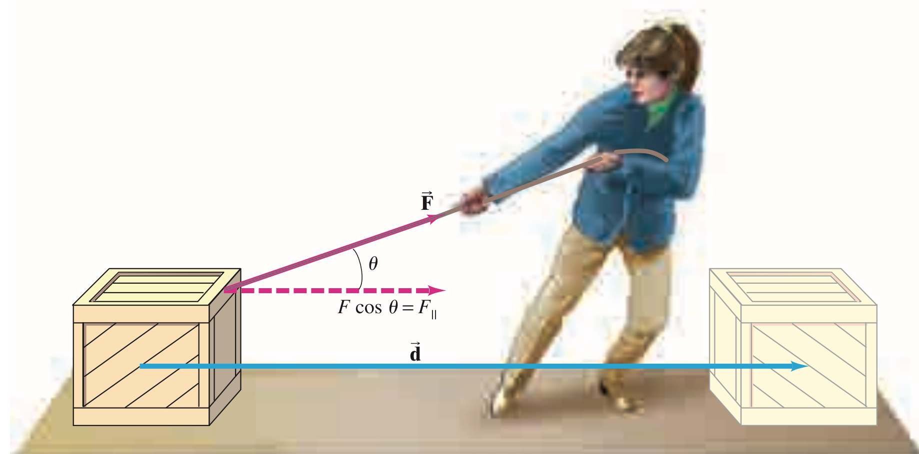
وحدة الشغل: الجول

ولقد تمت إعادة تعريف وحدة الشغل $(\text{N}\cdot\text{m})$ طبقًا لنظام الوحدات الدولي SI لتصبح **الجول (Joule)** وتُكتب باختصار (J)، حيث إنّ $1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$.

وتعطى وحدة الشغل بالإرج (*erg*) طبقًا لنظام (cgs) أو نظام cgs حيث إنّ $1\text{ erg} = 1\text{ dyne}\cdot\text{cm}$. وكذلك يُقاس الشغل حسب الوحدات البريطانية بالقدم – باوند (ft.lb).

وأمّا العلاقة بين الوحدات السابقة فهي كالتالي: $1\text{ J} = 10^7\text{ erg} = 0.7376\text{ ft}\cdot\text{lb}$.

الشّكل 6 – 1: عند سحب الفتاة الصندوق بمحاذاة الأرض كما في الشكل، فإنّ الشغل المبذول بواسطة القوة $\vec{\mathbf{F}}$ يُعطى بالمعادلة التالية: $W = Fd\cos\theta$، حيث $\vec{\mathbf{d}}$ تمثل هنا إزاحة الصندوق عن موضعه الأصليّ.





الشكل 6–2 لا يبذل الرجل أيّ شغل على كيس المشتريات؛ لأنّ اتجاه القوة $\vec{F}_P$ عموديّ على اتجاه الإزاحة $\vec{d}$.

تنويه:
قوة لا تحدث شغلا

من المكن أن يتأثر جسم ما بقوة لا تحدث شغلًا. فعلى سبيل المثال، لا يتمّ بذل أيّ شغلٍ على كيس المشتريات الثقيل عند إمساكه بواسطة اليدين وهما في وضع السكون. فعلى الرغم من تأثر كيس المشتريات بقوّة الرفع، فإنّ عدم إزاحة الكيس أفقيًّا جعلت قيمة الشغل المبذول عليه مساويةً للصفر، $W = 0$. وبما أننا بحاجة إلى كلٍّ من القوة والإزاحة للحصول على الشغل، فإنّه لا يتمّ بذل أيّ شغل على الكيس الثقيل عند حمله والسير به أفقيًّا بسرعةٍ ثابتةٍ كما في (الشكل 6 – 2). تعني السرعة الثابتة أنّ محصّلة القوى على الكيس في اتجاه الحركة تساوي صفرًا. إنّ الشخص الظاهر في(الشّكل 6 – 2) يرفع كيس المشتريات الثقيل بقوّةٍ عموديّةٍ إلى أعلى تعادل بالقيمة وتعاكس بالاتجاه قوة جذب الأرض للكيس. ومن الواضح أنّ هذه القوّة العموديّة لا تساهم في حركة الكيس الأفقيّة أو إزاحته. وعليه، فهي لا تبذل أيّ شغل على الكيس. إنّ تفسير هذه النتيجة الحتمية يكمن في طريقة تعريفنا للشغل بدلالة (المعادلة 6 – 1): $W = 0$، لأنّ $\theta = 90°$ و $\cos 90° = 0$. لذا، فإنّ القوة العموديّة على اتجاه الحركة لا تبذل أيّ شغل (لاحظ أنّه يتمّ بذل شغل على الكيس بواسطة قوّتي التسارع والتباطؤ الأفقيّتين لحظة بدء الحركة وعند التوقف).

تنويه:
اذكر ما إذا كان الشغل مبذولا على الجسم أو بوساطته.

ومن الضروري أن نحدّد ما إذا كان الجسم المعني هو الذي بذل الشغل أو أنّ الشغل قد بُذِلَ عليه. ومن المهمّ كذلك أن نحدّد ما إذا كان الشغل المبذول هو نتيجة تأثّر هذا الجسم بقوّةٍ ما، أم أنّه محصّلة لعدّة قوى تؤثّر فيه.

المثال 6-1 الشغل المبذول على عربة

يدفع شخص عربة كتلتها 50-kg مسافة 40 m بمحاذاة سطحٍ أفقي بواسطة قوّةٍ ثابتةٍ مقدارها $F_P = 100\text{ N}$، تعمل بزاوية مقدارها 37° فوق الأفق كما في (الشّكل 6 – 3). فإذا كان السّطح الأفقي الخشن سببًا لقوّة الاحتكاك ذات المقدار $F_{fr} = 50\text{ N}$، فحدّد كلًّا من: (أ) الشغل المبذول على العربة بواسطة كلّ قوّةٍ على حدة. (ب) المحصّلة الكليّة للشغل المبذول على العربة.

النّهج: يتمّ اختيار نظام الإحداثيّات بحيث يمكن اعتبار $\vec{x}$ متجهًا يمثل الإزاحة (40-m بمحاذاة المحور السيني). إن القوى المؤثّرة في الجسم هي أربع قوى مختلفة في هذا المثال كما في (الشكل 6 – 3) وهي كما يلي: قوّة الدفع $\vec{F}_P$، وقوّة الاحتكاك مع السطح $\vec{F}_{fr}$، وقوّة جذب الأرض للعربة (الوزن) $m\vec{g}$، وقوّة دفع السطح العمودية إلى أعلى $\vec{F}_N$. وبذلك تكون محصلة القوى المؤثّرة في العربة هي محصّلة الجمع الاتجاهي لهذه القوى الأربع.

الحـــلّ: (أ) إنّ الشغل المبذول بواسطة كلٍّ من القوّة العمودية وقوّة جذب الأرض للأجسام يساوي صفرًا، ويعود السبب في ذلك بالضرورة إلى الاتجاه العمودي لهاتين القوّتين مقارنةً مع اتجاه الإزاحة $\vec{x}$ ($\theta = 90°$ في المعادلة 6 – 1):

$$W_G = mgx\cos 90° = 0$$
$$W_N = F_N x\cos 90° = 0$$

الشغل المبذول بواسطة $\vec{F}_P$ هو:

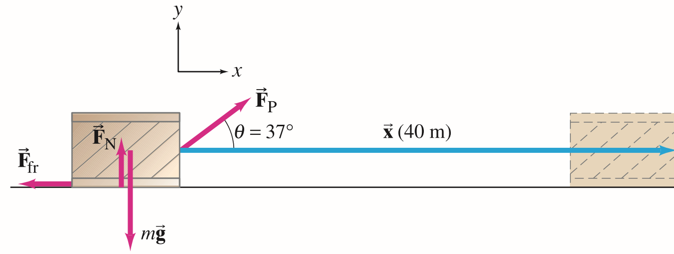
$$W_P = F_P x\cos\theta = (100\text{ N})(40\text{ m})\cos 37° = 3200\text{ J}$$

الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك هو:

$$W_{fr} = F_{fr} x\cos 180° = (50\text{ N})(40\text{ m})(-1) = -2000\text{ J}$$

إنّ الزاوية المحصورة بين كلٍّ من الإزاحة $\vec{x}$ والقوّة $\vec{F}_{fr}$ هي 180°. وعليه، فإنّ اتجاه قوّة الاحتكاك يعاكس اتجاه الحركة ليكون الناتج شغلًا سالبًا مبذولًا على العربة.

الشّكل 6 – 3 (المثال 6 - 1). تُدفعُ عربةٌ كتلتها 50-kg بمحاذاة السطح.



ب) من الممكن حساب محصّلة الشغل بطريقتين متكافئتين هما:

(1) بناءً على تعريف الشغل ككميّة: عن طريق الجمع الجبري للشغل المبذول بواسطة القوى المختلفة حيث W_{net} هي محصّلة الشغل الكلّيّ المبذول بواسطة القوى المؤثّرة جميعها في الجسم.

W_{net} هو الشغل المبذول بواسطة القوى المؤثرة جميعها في الجسم.

$$W_{net} = W_G + W_N + W_P + W_{fr}$$
$$= 0 + 0 + 3200\,J - 2000\,J$$
$$= 1200\,J$$

(2) عن طريق تحديد محصّلة القوى الاتجاهيّة المؤثّرة في الجسم، ومن ثم أخذ مركبتها المحاذية لاتجاه الإزاحة:

$$(F_{net})_x = F_P \cos\theta - F_{fr}$$

وبذلك تكون محصّلة الشغل

$$W_{net} \equiv (F_{net})_x x = (F_P \cos\theta - F_{fr})x$$
$$= (100\,N \cos 37° - 50\,N)(40\,m)$$
$$= 1200\,J$$

تنعدم الإزاحة في الاتجاه العمودي (الاتجاه العادي). لذا، لا يوجد شغلٌ في هذا الاتجاه .

تنويه:
شغل سالب

لقد رأينا في (المثال 6 – 1)كيف أنّ قوّة الاحتكاك تبذل شغلًا سالبًا. وعلى نحو عام، يُعدّ الشغل المبذول بواسطة قوّة ما سالبًا عندما تؤثّر القوّة (أو مركبة القوة، $F_{\parallel}$) باتجاه معاكس لاتجاه الحركة . ونستطيع أن نرى بوضوح أنّ القوّة التي تبذل شغلًا سالبًا يمكن أن تعمل على إبطاء الجسم إذا كانت هي القوّة الوحيدة المؤثّرة فيه. أمّا عندما يكون الشغل موجبًا، فإنّ القوّة المؤثّرة تعمل بالطبع على زيادة سرعة الجسم.

تمرين أ: تمّ سحب صندوقٍ بمحاذاة السطح بواسطة قوة $\vec{F}_P$ تعمل زاوية θ مع الأفقي كما في (الشكل 6 – 1 أو 6 – 3). عندما نُبقي قيمة القوّة $\vec{F}_P$ ثابتة ونزيد قيمة الزاوية θ، فهل يبقى الشغل المبذول بواسطة $\vec{F}_P$: (أ) ثابتًا كما هو؟ أم (ب) يزداد؟ أم (جـ) يقلّ؟ أم (د) يزداد أولا، ومن ثمّ يقلّ؟

طريقة حل المسائل: **الشّغل**

1. **ارسم مخطط جسمٍ حرٍّ** مظهرًا القوى المؤثّرة جميعها في الجسم المراد دراسته.
2. **اختر نظامًا إحداثيًّا** xy مناسبًا. من المناسب أن تختار اتجاه أحد المحاور موازيًا لاتجاه إحدى القوى المؤثّرة في الجسم المتحرك، أو موازيًا لاتجاه الحركة. [أي من الممكن اختيار اتجاه أحد المحاور موازيًا لاتجاه حركة الجسم على السطح المائل، وبذلك يكون المحور موازيًا للسطح المائل.]
3. طبّق **قوانين نيوتن** لتحديد أيّ قوّةٍ مجهولة.
4. أوجد **قيمة الشغل المبذول بواسطة أيّ قوّة** باستخدام $W = Fd\cos\theta$ مع مراعاة كون الشغل سالبًا عندما تعاكس القوّة اتجاه الإزاحة.
5. لحساب **محصّلة الشغل** المبذول على الجسم؛ عليك أن: (أ) تعمل على إيجاد الشغل المبذول بواسطة كلّ قوّة على حدة، ومن ثمّ تقوم بجمعها حسابيًّا. أو (ب) تعمل على إيجاد محصلة القوى المؤثرة في الجسم F_{net}، ومن ثَمّ تحسب محصلة الشغل المبذول، في حالة القوّة الثابتة، فتكون: $W_{net} = F_{net}\,d\cos\theta$.

المثال 2-6 الشغل المبذول على حقيبة الظهر:

حدّد كلًّا من: (أ) مقدار الشغل الذي يجب أن يبذله متسلّق جبال على حقيبة ظهر كتلتها 15.0-kg عند حملها إلى قمة ارتفاعها $h = 10.0$ m كما في (الشكل 6 – 4 أ). (ب) الشغل المبذول على حقيبة الظهر بواسطة الجاذبية. (جـ) محصّلة الشغل المبذول على حقيبة الظهر. وللسهولة: اهمل الاحتكاك، وافرض أن الحركة تتم بسرعة ثابتة (اهمل التسارع).

النهج: اتبع الطريقة المقترحة للحل أعلاه خطوة خطوة.

الحـــل:

1. ارسم مخطط جسم حرّ. تظهر القوى المؤثرة في حقيبة الظهر في (الشكل 6 – 4 ب) اتجاه قوّة جذب الأرض $m\vec{g}$ إلى الأسفل، والقوّة التي يجب أن يؤثّر بها المتسلّق إلى الأعلى، $\vec{F}_H$، ليدعم حقيبة الظهر. وبما أنّ المتسلّق يتحرك بسرعة ثابتة، فإنّه لا يؤثّر بأيّ قوى أفقية في الحقيبة نتيجة انعدام تسارعه.

2. اختر نظامًا إحداثيًّا. بما أننا نهتم بالحركة العمودية لحقيبة الظهر، فسنختار الاتجاه الصّاديّ الموجب إلى أعلى.

3. طبّق قوانين نيوتن. إنّ تطبيق قانون نيوتن الثاني على حقيبة الظهر بالاتجاه العمودي يعطي:

$$\Sigma F_y = ma_y$$
$$F_H - mg = 0$$

وعليه، فإنّ

$$F_H = mg = (15.0\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2) = 147\,\text{N}$$

4. أوجد قيمة الشغل المبذول بواسطة القوة. (أ) لحساب الشغل المبذول على حقيبة الظهر؛ نكتب (المعادلة 6 – 1) كالتالي :

$$W_H = F_H(d\cos\theta)$$

ونلاحظ (الشكل 6 – 4 أ) أنّ $d\cos\theta = h$. لذا، فإنّ الشغل المبذول بواسطة المتسلق

$$W_H = F_H(d\cos\theta) = F_H h = mgh$$
$$= (147\,\text{N})(10.0\,\text{m}) = 1470\,\text{J}$$

لاحظ أنّ الشغل المبذول لا يعتمد على زاوية ميل التلة θ، ولكنه يعتمد على التغيير في مقدار الارتفاع فقط .
أي أنّ المتسلق سيبذل الشغل نفسه عند رفعه حقيبة الظهر إلى ارتفاع h.

(ب) الشغل المبذول على حقيبة الظهر بواسطة الجاذبية الأرضية (قوة جذب الأرض) من (المعادلة 6 – 1) و (الشكل 6 – 4 جـ) هي

$$W_G = F_G\, d\cos(180° - \theta)$$

وبما أنّ

$$\cos(180° - \theta) = -\cos\theta$$

إذن

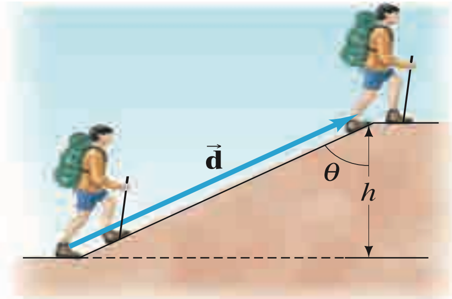
$$W_G = F_G\, d(-\cos\theta) = mg(-d\cos\theta)$$
$$= -mgh$$
$$= -(15.0\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2)(10.0\,\text{m}) = -1470\,\text{J}$$

ملحوظة: لا يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبية الأرضية (السالب هنا) على زاوية الميل، ولكنه يعتمد على مقدار ارتفاع التلة h فقط. ويمكن تفسير ذلك بناءً على الاتجاه العمودي لتأثير قوة جذب الأرض للأجسام. ولهذا، فإنّ المركبة العمودية للإزاحة هي المركبة الوحيدة التي تساهم في بذل الشغل.

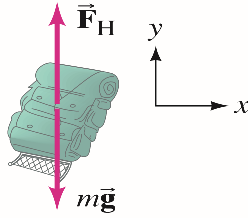
5. احسب محصلة الشغل المبذول. (أ) إنّ **محصلة** الشغل المبذول على حقيبة الظهر هي نتيجة حتمية $W_{net} = 0$ لأنّ محصلة القوى المؤثرة في الحقيبة تساوي صفرًا (تسارع الحقيبة يساوي صفرًا). ونستطيع كذلك تحديد محصلة الشغل المبذول بجمع الشغل المبذول بواسطة كلّ قوة على حدة

$$W_{net} = W_G + W_H = -1470\,\text{J} + 1470\,\text{J} = 0$$

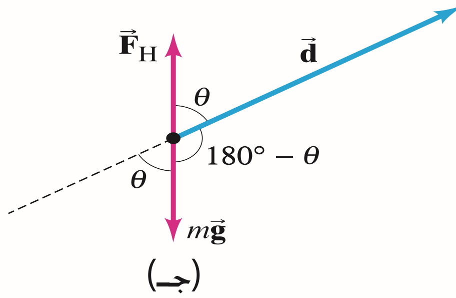
ملحوظة: على الرغم من أنّ **محصّلة** الشغل المبذول على حقيبة الظهر تساوي صفرًا، فإنّ المتسلّق يبذل شغلًا على حقيبة الظهر يعادل 1470 J. الطاقة جميعها



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل **6 – 4** (المثال 6 - 2) .

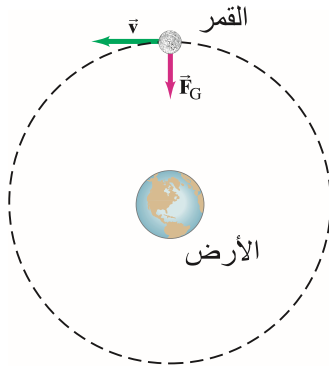
حل المسائل

يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبية على الارتفاع (ارتفاع التلة)، و لا يعتمد على زاوية ميل المنحدر.

المثال المفاهيمي 3-6 هل تبذل الأرض شغلًا على القمر؟

يدور القمر حول الأرض في مدار يكاد يكون كرويًّا تحت تأثير قوّةٍ جذب الأرض له. فهل تبذل الجاذبية الأرضية: (أ) شغلًا موجبًا على القمر؟ أم (ب) شغلًا سالبًا على القمر؟ أم (جـ) أيّ شغل على القمر؟

الحل: تعمل قوة الجاذبية الأرضية على جذب (الأجسام) القمر باتجاه الأرض، وبذلك توفر تسارعًا مركزيًّا إلى الداخل، وباتجاه موازٍ لامتداد نصف قطر مدار القمر حول الأرض. ويكون اتجاه إزاحة القمر عند كلّ لحظة باتجاه مماس الدائرة، وباتجاه سرعة القمر المتجهة نفسها؛ أي عموديًّا على كلّ من نصف قطر المسار واتجاه قوة الجاذبية الأرضية. وعليه، فإنّ الزاوية المحصورة بين اتجاه القوّة $\vec{F}_G$ والإزاحة اللحظية للقمر هي $90°$. ولذلك، فإنّ الشغل المبذول بواسطة الأرض على القمر خلال دورانه حولها يساوي صفرًا $(\cos 90° = 0)$. وهذا هو السبب في أنّ القمر والأقمار الصناعية جميعها تستطيع البقاء في مداراتها حول الأرض دون الحاجة إلى صرف أيّ كمّيةٍ من الوقود؛ أي أنّها لا تحتاج إلى بذل أيّ شغل ضد قوّة الجاذبيّة الأرضيّة وهي في مداراتها.



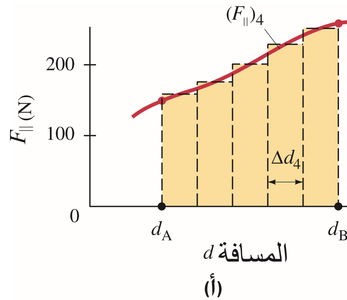
الشكل 6 – 5 (المثال 6 - 3).

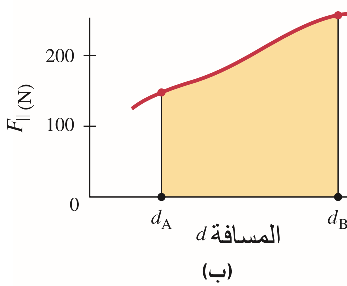
* 2-6 الشغل المبذول بواسطة قوة متغيرة

يمكن حساب الشغل المبذول على جسم ما بواسطة قوة ثابتة باستخدام (المعادلة 6 – 1). وتكون القوّةُ المسبّبة للشغل متغيّرةً في حالاتٍ كثيرةٍ مقدارًا أو اتجاهًا. وعلى سبيل المثال، الشغل الناتج من ابتعاد صاروخ عن سطح الأرض؛ فهو شغل متغير ناتج من تغير قوة جذب الأرض للصاروخ التي تتناسب عكسيًّا مع مربع بُعد الصاروخ عن مركز الأرض. وهناك أمثلة أخرى للشغل الناجم عن قوّةٍ متغيّرة، مثل قوة إرجاع الزنبرك التي تزداد بزيادة مقدار استطالته، وكذلك الشغل المتغير الناجم عن قوة دفع صندوق أو عربة إلى أعلى تلّة.

يمكن حساب الشغل الناتج من القوّة المتغيّرة بالرسم. وتستخدم الخطوات نفسها التي تم اتباعها في السابق لحساب الإزاحة عند معرفة السرعة المتجهة بدلالة الزمن (البند 2–8). ولحساب الشغل الناتج من القوة المتغيرة: نرسم $F_\parallel (= F\cos\theta)$، مركبة $\vec{F}$ الموازية لاتجاه الحركة عند أيّ نقطة، بدلالة المسافة d، كما في (الشكل 6–6 أ). تقسم المسافة إلى مقاطع صغيرة Δd، ويمثل متوسط $F_\parallel$ لكلّ مقطع بخطّ متقطع ليكون الشغل المرتبط بكلّ مقطع هو $\Delta W = F_\parallel \Delta d$، وهي مساحة المستطيل ذي العرض Δd والارتفاع $F_\parallel$. وعليه، فإنّ الشغل اللازم لإزاحة جسم ما مسافة كلية مقدارها $d = d_B - d_A$ هو مجموع مساحات المستطيلات (وعددها 5 كما هو موضح في الشكل 6–6أ)، وعادةً ما يتم تقدير قيمة $F_\parallel$ المتوسطة لكلّ مقطع كي تكون قيمة الشغل التقريبية المقدرة مقبولة. وعندما يتم تقسيم المسألة إلى عدد أكبر من المقاطع، فإنّ ذلك يؤدي إلى صغر قيمة Δd بهدف إيجاد شغل مبذول أكثر دقة. وعندما تقترب قيمة Δd من الصفر، تقترب قيمة المساحة الكلية للمستطيلات ذات السمك الضئيل جدًّا إلى مقدار المساحة تحت المنحنى (الشكل 6 – 6 ب). وعليه، فإنّ الشغل الناتج من إزاحة جسم ما بواسطة قوّةٍ متغيّرةٍ بين نقطتين يعادل المساحة تحت منحنى $F_\parallel$ و d بين تلك النقطتين.

الشكل 6 – 6 (المثال 6 - 3).
يمكن حساب الشغل المبذول بواسطة القوة F عن طريق مايلي: (أ) جمع مساحات المستطيلات. (ب) حساب المساحة تحت المنحنى $F_\parallel$ بدلالة d.

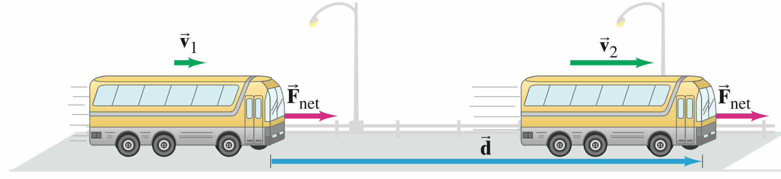




3-6 الطّاقة الحركيّة، ومبدأ الشّغل والطّاقة

تُعدّ الطاقة من أهم المبادئ في العلوم. وعلى الرغم من ذلك، فلا يمكننا إعطاء وصف شامل للطاقة بإيجاز. إلا أنّه من الممكن ببساطة تعريف كلّ نوع من أنواع الطاقة على حدة. وسنعرّف في هذا الفصل الطاقة الحركية الانتقالية وبعض أشكال طاقة الوضع. وسنختبر في الفصول القادمة أنواعًا مختلفةً من الطاقة كتلك المرتبطة بالحرارة (الفصلان الرابع عشر والخامس عشر). الأمر الحاسم لأنواع الطاقة جميعها هو مجموعها الكلي "الطاقة الكلية"، وهي كميّة ذات قيمة ثابتة إذا تم قياسها قبل حدث ما ومقارنة ذلك بمقدارها بعد الحدث؛ أي أنّ الطاقة ككميّة هي محفوظة. وسنعرّف الطاقة هنا بالطريقة التقليديّة لتخدمنا في هذا الفصل تحديدًا على أنها القدرة على بذل الشغل. يُعدّ هذا التعريف البسيط غير دقيق تماما، وليس صالحًا لوصف أنواع الطاقة جميعها.* لكنه يُعدّ تعريفًا مناسبًا وصالحًا للاستخدام عند التعامل مع الطاقة الميكانيكية، كما في هذا الفصل؛ ليقدّم ربطًا أساسيًّا بين الشغل والطاقة.

* هناك أيضًا أنواعٌ اخرى من الطاقة غير قادرة على بذل شغل. كتلك المرتبطة بالحرارة وسيتم التعرّض لها ومناقشتها في (الفصل 15).



الشكل 6 − 7 قوة محصلة ثابتة F_{net} تعمل على تسريع حافلة من سرعة v_1 إلى سرعة v_2 خلال إزاحة مقدارها d. محصلة الشغل المبذول هي $W_{net} = F_{net}d$.

وسنعرف الآن، ونناقش أحد الأشكال الأساسية للطاقة، وهي الطاقة الحركية.

يستطيع جسم متحرّك أن يبذل شغلًا على جسم آخر عندما يصطدم به. ومثال ذلك، اصطدام قذيفة مدفعية بحائط فتسقطه، ومطرقة تدقّ مسمارًا داخل لوح من الخشب فتدفعه إلى داخل هذه القطعة. ففي كلتا الحالتين السابقتين، يبذل الجسم المتحرك شغلًا على جسم ثابت لإزاحة الجسم الثابت عن موضعه الأصلي. فالجسم المتحرك قادر على بذل شغل. ولهذا يُقال إنّه يمتلك طاقة. وتُسمّى هذه الطاقة المرتبطة بالحركة **الطاقة الحركية**، وهي مشتقّة من كلمة يونانية بمعنى الحركة.

وللحصول على تعريف كمّيّ لهذه الطاقة، سنتناول جسمًا صلبًا كتلته m يسير في خطّ مستقيم بسرعة ابتدائية مقدارها v_1. فعندما تؤثّر في الجسم قوّة محصّلة ثابتة F_{net} باتّجاه موازٍ لحركته وتسبب إزاحةً مقدارها d كما في (الشكل 6−7)، فإنّها تعمل على تسريعه بانتظام إلى سرعة v_2، لتصبح محصلة الشغل المبذول على الجسم $W_{net} = F_{net}d$.

نستخدم قانون نيوتن الثاني، $F_{net} = ma$، وكذلك (المعادلة 2−11 ج) التي تُكتب الآن كالتالي: $v_2^2 = v_1^2 + 2ad$، بحيث تمثل v_1 السرعة الابتدائية، في حين تمثّل v_2 السرعة النهائية. ونحلّ المعادلة السابقة للحصول على التسارع، a، في (المعادلة 2−11 ج)،

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2d}$$

ونعوّض في $F_{net} = ma$ ، ونحدد الشغل المبذول كما يلي:

$$W_{net} = F_{net}d = mad = m\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2d}\right)d = m\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2}\right) \quad \textbf{(2 − 6)}$$

أو

$$W_{net} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

تُعرّف الكميّة $\frac{1}{2}mv^2$ بالطاقة الحركيّة الانتقالية (KE) للجسم:

تعريف الطاقة الحركية

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 \quad \textbf{(3 − 6)}$$

(تمّت هنا إضافة كلمة "انتقالية" إلى الطاقة الحركية ليتم تمييزها عن الطاقة الحركية الدورانية التي سنشرحها في الفصل الثامن). كما يمكن تطبيق المعادلة 6 − 2 على جسم يتحرك انتقاليًا في ثلاثة أبعاد تحت تأثير قوى متغيرة، على الرغم من أنّ هذه المعادلة تمّ اشتقاقها أصلًا لتصف حركة جسم يتأثر بقوة ثابتة في بُعدٍ واحد. ونكتب (المعادلة 6 − 2) كما يلي:

$$W_{net} = \text{KE}_2 - \text{KE}_1$$

أو:

مبدأ الشغل والطاقة

$$W_{net} = \Delta\text{KE} \quad \textbf{(4 − 6)}$$

مبدأ الشغل والطاقة

تُعدّ (المعادلة 6 − 4 أو المعادلة 6 − 2) نتيجة مهمة تُعرف بمبدأ الشغل والطاقة. ويمكن وصفها بما يلي:

محصّلة الشغل المبذول على جسم ما تعادل التغيّر في طاقة الجسم الحركية.

لاحظ أنّه قد استخدم قانون نيوتن الثاني، $F_{net} = ma$ وحيث تمثل F_{net} محصلة القوى العاملة والمؤثرة في الجسم جميعها. لذا، فإن مبدأ الشغل والطاقة ينطبق عندما تكون W هي الشغل الكلّي المبذول على الجسم؛ أي الشغل المبذول بواسطة القوى العاملة المؤثرة في الجسم جميعها.

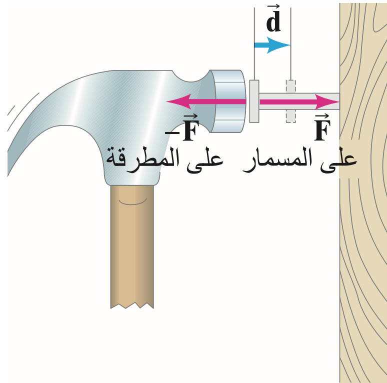
تنويه:
الشغل والطاقة صحيحة فقط باستخدام الشغل الكلي.

يُعدّ مبدأ الشغل والطاقة طريقةً ناجحةً في إعادة صياغة قوانين نيوتن. ويخبرنا هذا المبدأ أنه إذا تم بذل محصلة شغل (موجب) W على جسم ما، فإنّ طاقة الجسم الحركية تزداد بمقدار W. ويظلّ هذا المبدأ صالحًا للتطبيق في الاتجاه المعاكس؛ أي إذا كانت محصلة الشغل المبذول على الجسم سالبة، فإنّ طاقة الجسم الحركية تتناقص بمقدار W. أي أنّ تأثير محصلة قوى على جسم ما باتجاه معاكس لاتجاه حركته يعمل على تقليل سرعته وطاقته الحركية. ومثال ذلك المطرقة المتحركة في (الشكل 6−8) والتي تعمل على طرق المسمار. وتعمل القوة المحصلة على المطرقة $-\vec{F}$ في (الشكل 6−8) ، التي تم افتراضها ثابتة للسهولة) باتجاه اليسار، في حين أن إزاحة المطرقة $\vec{d}$ فتعمل في اتجاه اليمين. ولذلك، فإنّ الشغل الكلي المبذول على المطرقة، $W_h = (F)(d)(\cos 180°) = -Fd$، تكون سالبة، وتعمل على تناقص الطاقة الحركية للمطرقة (غالبًا إلى الصفر).

يبين (الشكل 6 – 8) كيف يمكن اعتبار الطاقة القدرة على بذل شغل. تعمل المطرقة، وهي تتباطأ، شغلاً موجبًا على المسمار: إذا أثّر المسمار بقوة $-\vec{F}$ في المطرقة لإبطائها، فإنّ المطرقة ستؤثّر في المسمار بقوة $+\vec{F}$ (قانون نيوتن الثالث) من خلال المسافة d. وعليه، يكون الشغل المبذول على المسمار بواسطة المطرقة هو: $W_n = (+F)(+d) = Fd$، وهو موجب. ويكون الشغل المبذول على المسمار $W_n = Fd = -W_h$ يعادل سالب الشغل المبذول على المطرقة؛ أي أنّ انخفاض قيمة الطاقة الحركية للمطرقة W_n يعادل قيمة الشغل التي تستطيع المطرقة القيام به على جسم آخر، وهو متوافق مع القدرة على بذل شغل. في حين تتناسب الطاقة الحركية الانتقالية $(= \frac{1}{2}mv^2)$ طرديًّا مع كتلة الجسم ومربّع سرعته. ولذلك، فعند مضاعفة الكتلة تتضاعف الطاقة الحركية. أمّا عند مضاعفة السرعة، فإنّ الطاقة الحركية تصبح أربعة أضعاف ما كانت عليه لتتضاعف قدرتها على بذل الشغل إلى أربعة أضعاف.

لنلخص الآن العلاقة بين الشغل والطاقة الحركية (المعادلة 6–4) بما يلي: تزداد الطاقة الحركية للجسم إذا كانت محصلة الشغل المبذول على الجسم موجبة. ولكن إذا كانت محصّلة الشغل W المبذول على الجسم سالبة، فإنّ طاقة الجسم الحركية يجب أن تقلّ. أما إذا كانت محصّلة الشغل W المبذول على الجسم تساوي صفرًا، فإنّ الطاقة الحركية تبقى ثابتة (وهذا يدل على أنّ سرعة الجسم تبقى مقدارًا ثابتًا).

ونتيجة للعلاقة المباشرة بين الشغل والطاقة الحركية (المعادلة 6–4)، فإنّ وحدات الطاقة هي نفسها وحدات الشغل وهي: الجول حسب النظام الدولي SI، والإرج حسب نظام (cgs)، والقدم – باوند حسب النظام البريطاني. وكالشغل تمامًا، فإنّ الطاقة الحركية هي كميّة قياسيّة. الطاقة الحركيّة الكليّة لمجموعة من الأجسام هي مجموع الطاقة الحركية لهذه الأجسام كلّ على حدة.



الشكل 6 - 8 تعمل مطرقة متحركة على دقّ مسمار، ثم تتوقف كلّيًا. تؤثر المطرقة بقوة F في المسمار خلال فترة تلامسهما؛ ويؤثر المسمار بقوة في المطرقة (قانون نيوتن الثالث). ويُعدّ الشغل المبذول من المسمار على المطرقة موجبا ($W_n = Fd > 0$). أما الشغل المبذول بواسطة المطرقة على المسمار فهو سالب ($W_h = -Fd$).

تزداد KE إذا كان $If\ W_{net} > 0$
ولكنها تقلّ KE إذا كان $If\ W_{net} < 0$

وحدة الطاقة: الجول

المثال 6-4 KE والشغل المبذول على كرة بيسبول.

قذفت كرة بيسبول كتلتها 145-g فاكتسبت سرعة مقدارها $25\ m/s$، احسب مايلي: (أ) طاقة الكرة الحركية. (ب) محصّلة الشغل المبذول على الكرة لإكسابها هذه السرعة، إذا بدأت الحركة من السكون.

النّهج: نبدأ بتعريف الطاقة الحركية (المعادلة 6–3)، ومن ثَمَّ نستخدم مبدأ الشغل والطاقة (المعادلة 6 – 4).

الحلّ: (أ) الطاقة الحركية لكرة البيسبول بعد قذفها هي:

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0.145\ kg)(25\ m/s)^2 = 45\ J$$

(ب) بما أنّ الطاقة الحركية الابتدائية كانت تعادل صفرًا، فإنّ الشغل المبذول يعادل الطاقة الحركية النهائية ومقدارها 45 J.

المثال 6-5 شغل مبذول على سيارة يزيد من طاقتها الحركية KE .

ما مقدار محصّلة الشغل اللازم بذله لتسريع سيارة كتلتها 1000-kg من 20 m/s إلى 30 m/s (الشكل 6–9)؟

النّهج: لكي نستطيع استخدام مبدأ الشغل والطاقة ولتبسيط الوضع: سنتعامل مع السيارة وكأنها جسيم جاسىء (صلب) متماسك.

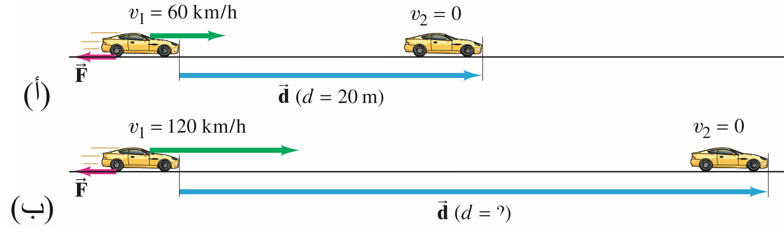
الحــلّ: محصّلة الشغل المبذول تساوي الزيادة في الطاقة الحركية:

$$W = KE_2 - KE_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$
$$= \frac{1}{2}(1000\ kg)(30\ m/s)^2 - \frac{1}{2}(1000\ kg)(20\ m/s)^2 = 2.5 \times 10^5\ J$$

ملحوظة: قد ترغب في محاولة حلّ هذا المثال عن طريق إيجاد القوة باستخدام (المعادلة 6–1) ، ولكنك لن تصل إلى النتيجة المرجوة باستخدام هذه الطريقة، ويعود السبب في ذلك إلى عدم وجود أيّ معلومات عن زمن تسارع السيارة، ولا عن المسافة المقطوعة خلال التسارع. لذا، يمكن لقوّة كبيرةٍ أن تعمل خلال إزاحةٍ صغيرةٍ أو أن تعمل قوّةٌ صغيرةٌ خلال إزاحةٍ كبيرةٍ لتبذلا الشغل ذاته.

الشّكل 6-9 المثال 6-5.





الشكل 6 - 10 (المثال 6 - 6).

المثال المفاهيمي 6-6 **الشغل المطلوب لإيقاف السيارة.** تحتاج مركبة تسير بسرعة 60 km/h إلى مسافة $d = 20$ m لكي تتوقّف توقّفًا تامًا (الشكل 6–10أ). ما المسافة التي تحتاج إليها المركبة للوقوف إذا كانت تتحرك بضعف سرعتها الابتدائية السابقة؛ أي بسرعة 120 km/h (الشّكل 6–10ب)؟ افرض أنّ قوة الإيقاف العظمى لا تعتمد على مقدار السرعة.

الحل: بما أنّ قوّة الإيقاف F، تُعدّ ثابتة تقريبًا، فإنّ الشغل اللازم بذله لإيقاف المركبة Fd يتناسب طرديًا مع المسافة المقطوعة. وعندما نطبق مبدأ الشغل والطاقة، علمًا أنّ اتجاه $\vec{F}$ هو عكس اتجاه $\vec{d}$ وأنّ السرعة النهائية للمركبة هي صفر، فسنحصل على ما يلي:

$$W_{net} = Fd\cos 180° = -Fd$$

إذن

$$-Fd = \Delta KE = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

$$= 0 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

وعليه، بما أنّ القوّة والكتلة كمّيتان ثابتتان، فإنّ مسافة الإيقاف d ستزداد طرديًّا مع مربّع السرعة:

$$d \propto v^2$$

إذا تضاعفت السرعة الابتدائية للمركبة، فستصبح مسافة الإيقاف $(2)^2 = 4$ أكبر بأربعة أضعاف سابقتها أو تعادل 80 m.

التمرين ب: هل يمكن للطاقة الحركية أن تكون مقدارًا سالبًا؟

تطبيق الفيزياء
مسافة إيقاف السيارة $\propto$ مربع السرعة الابتدائية

6-4 طاقة الوضع

طاقة الوضع

لقد ناقشنا حتى الآن طاقة الجسم المرتبطة بحركته، والتي سُمّيت بالطاقة الحركيّة. والآن، سنتكلّم عن **طاقة وضع الأجسام أو الجسم**، التي ترتبط بمكان وجوده، أو تشكيله مقارنةً بما يحيط به أو حوله. ويمكن تعريف أنواع عدّة من طاقة الوضع (PE) بحيث يرتبط كلّ نوع بقوّةٍ ما.

ويُعتبر نابض الألعاب التي تدار بواسطتها مثالًا على جسم له طاقة كامنة. وقد اختزنت هذه الطاقة الكامنة في النابض من خلال الشغل الذي يبذله مشغل اللعبة عند لفه للنابض. وعند استرخاء النابض، فإنّه يؤدّي بقوّةٍ عملًا لجعل اللعبة تتحرك.

طاقة الوضع الناتجة من الجاذبية الأرضية

ربما تُعدّ طاقة جذب الأرض للأجسام من **أكثر طاقات الوضع** شيوعًا. فعلى سبيل المثال، سيمتلك حجر البناء طاقة وضع جديدة مرتبطة بموقعه الجديد ناجمة عن رفعه من وضعه الأصلي. ولكي يستطيع هذا الحجر أن يبذل شغلًا عندما يُترك ليسقط من موضعه باتجاه سطح الأرض، ولكي يكون هذا الشغل ناتجًا من قوة جذب الأرض له، دعونا الآن نختبر شكل طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض لجسم موجود بالقرب من سطح الأرض. ولكي يتم رفع جسم كتلته m عن سطح الأرض؛ يجب أن يؤثر فيه بقوة mg قد تكون كتلك الناتجة من تأثير ذراع شخصٍ ما.

ولرفع الحجر من موضعه الأصلي رأسيًّا وبلا تسارع مسافة h، من موضع y_1 إلى موضع y_2 كما في الشكل 6−11 (تم اختيار الاتجاه الموجب إلى الأعلى)؛ يجب أن يبذل شخص شغلًا يعادل حاصل ضرب القوة الخارجية اللازمة، $F_{ext} = mg$ إلى الأعلى، بالإزاحة الرأسية h. حيث إنّ

$$W_{ext} = F_{ext}\, d \cos 0° = mgh$$
$$= mg(y_2 - y_1) \quad \text{(6 – 5 أ)}$$

تؤثّر الجاذبية الأرضية في الجسم أيضًا عندما يتحرك من y_1 إلى y_2، وتبذل شغلا عليه يساوي

$$W_G = F_G\, d \cos\theta = mgh \cos 180°$$

وهنا $\theta = 180°$ لأنّ اتّجاه كلٍّ من $\vec{F}_G$ و $\vec{d}$ متعاكسان. وعليه، فإنّ

$$W_G = -mgh$$
$$= -mg(y_2 - y_1) \quad \text{(6 – 5 ب)}$$

إذا تُرك الجسم من السكون ليسقط سقوطًا حرًّا من ارتفاع h تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة، فإنّه سيكتسب سرعةً تعطى بالعلاقة $v^2 = 2gh$ (المعادلة 2 − 11 ج). وتصبح طاقته الحركيّة، $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2gh) = mgh$ إذا اصطدم بسطح الأرض، فسيكون قادرًا على بذل شغل يعادل mgh (مبدأ الشغل − الطاقة). لذا، فإنّ رفع جسم كتلته m مسافة h يحتاج إلى شغلٍ مقداره mgh (المعادلة 6−5أ). وعندما يصبح الجسم على ارتفاع h، يصبح قادرًا على بذل شغل مقداره mgh.

وبناءً على ما سبق، نستطيع تعريف **طاقة الوضع** الناتجة من جذب الأرض للجسم، كحاصل ضرب وزن الجسم mg بارتفاعه y فوق مستوًى مرجعي (مثل سطح الأرض):

$$PE_{grav} = mgy \quad \text{(6 – 6)}$$

طاقة الوضع PE الناتجة من الجاذبية الأرضية

كلّما ارتفع الجسم عن سطح الأرض، زادت طاقة وضعه الناتجة من جذب الأرض له. وعند ربط (المعادلة 6−5 أ بالمعادلة 6−6)، سنحصل على

$$W_{ext} = mg(y_2 - y_1)$$
$$W_{ext} = PE_2 - PE_1 = \Delta PE \quad \text{(6 – 7 أ)}$$

أي أنّ الشغل المبذول بواسطة قوّةٍ خارجيّةٍ لنقل جسم كتلته m من نقطة 1 إلى نقطة 2 (بلا تسارع) يُعادل التغيّر في طاقة الوضع بين الموضعين 1 و 2.

وبطريقة بديلة، نستطيع التعبير عن التغيّر في طاقة الوضع، ΔPE، بدلالة الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضية نفسها : بدءًا من (المعادلة 6−5 ب)، نحصل على

$$W_G = -mg(y_2 - y_1)$$
$$W_G = -(PE_2 - PE_1) = -\Delta PE \quad \text{(6 – 7 ب)}$$

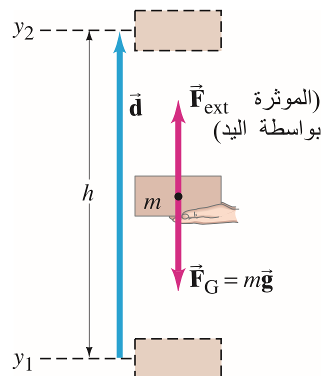
أي أنّ الشغل المبذول بواسطة الجاذبية الأرضية على جسم كتلته m خلال انتقاله من النقطة 1 إلى النقطة 2 يعادل سالب التغيّر في طاقة الوضع بين الموضعين 1 و 2.

ترتبط طاقة الوضع بقوّة، والقوّة المؤثّرة في جسمٍ ما عادةً ما تكون ناتجةً من جسمٍ آخر. لذلك تُعدّ طاقة الوضع خاصيّة للنظام ككلّ. والتغيّر في طاقة وضع جسمٍ ما تمّ رفعه مسافة y فوق سطح الأرض هي mgy. ويتكون النظام في هذه الحالة من الجسم والأرض، وصفتاهما المهمّتين هنا هما: كتلة الجسم (m)، والجاذبيّة الأرضيّة (g).

تنويه:

ترتبط طاقة الوضع بنظام لا بجسم بمفرده.

تعتمد طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض للأجسام على الارتفاع الرأسي **للأجسام فوق مستوى مرجعي** (المعادلة 6−6). ففي بعض الحالات، يختلط علينا الأمر ونتساءل عن المستوى المرجعي للارتفاع y. وعلى سبيل المثال، نستطيع أن نتساءل، ما المستوى المرجعي لكتاب رُفع عاليًا فوق طاولةٍ ما، هل هو مستوى سطح الطاولة؟ أم سطح الأرض؟ أم أنّ هناك نقطةً مرجعيّة أخرى؟



الشكل 6 – 11 شخص يؤثر إلى الأعلى بقوة $F_{ext} = mg$ ليرفع حجرًا من y_1 إلى y_2.

تنويه: التغير في طاقة الوضع PE فقط هو الذي له معنى فيزيائيّ.

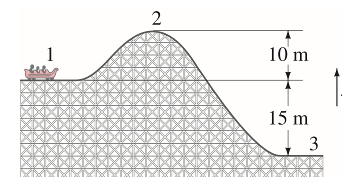
هناك معنى فيزيائي للتغيّر في قيمة طاقة الوضع فقط، ΔPE، وهو ما يرتبط بالشغل المبذول (المعادلة 6–7). وبما أنّ ما يمكن قياسه هو فقط ΔPE. فإنّنا نستطيع قياس y من أيّ نقطة مرجعية مناسبة على أن يتمّ تحديدها منذ البداية لتبقى ثابتةً لا تتغيّر وحتى نهاية الحسابات، علمًا أنّ التغيّر في طاقة الوضع بين أيّ نقطتين لا يعتمد على عملية اختيار هذه النقطة المرجعيّة أبدًا.

تعتمد طاقة الوضع PE المرتبطة بالجاذبية الأرضية بالارتفاع الرأسيّ.

ترتبط قوة جذب الأرض للأجسام بنتيجة مهمّة تمّت مناقشتها سابقا (انظر المثال 6–2 والشّكل 6–4)، بحيث تبذل هذه القوّة شغلًا في الاتجاه الرأسي : يعتمد الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضيّة على الارتفاع العمودي h، ولا يعتمد على المسار الحقيقي سواء أكان مباشرة إلى الأعلى، أم خلال مسار مائل إلى الأعلى. وعليه، نرى من (المعادلتين 6 − 7)أنّ التّغيّر في طاقة الوضع الناتج من جذب الأرض للأجسام يعتمد على الارتفاع الرأسي فقط، ولا يعتمد على المسار المتبع.

المثال 6-7 التغيّر في طاقات الوضع الأفعوانيّة.

تنتقل عربة أفعوانية كتلتها 1000-kg من النقطة 1 (الشكل 6–12) إلى النقطة 2، ومن ثَمَّ إلى النقطة 3. (أ) ما مقدار طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض للعربة عند كلّ من النقطتين 2 و3 مقارنةً بالنقطة 1؟ (ب) ما التغيّر في طاقة الوضع عند انتقال العربة من النقطة 2 إلى النقطة 3؟ (ج) أعدْ حلّ الجزأين (أ) و (ب)، مع أخذ النقطة المرجعية $(y = 0)$ عند النقطة 3.



الشّكل 6 – 12 المثال 6 –7

النّهج: نهتمُّ هنا بطاقة وضع النظام المكوّن من العربة والأرض. ونحدّد اتجاه y الموجب إلى أعلى، ومن ثمّ نستخدم تعريف طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض للأجسام لحساب طاقة الوضع (PE).

الحلّ: (أ) نحسب الارتفاعات نسبة إلى النقطة 1. وعليه، فإنّ طاقة الوضع الابتدائية تعادل صفرًا .

عند النقطة 2، $y_2 = 10\,\text{m}$ ،

$$PE_2 = mgy_2 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(10\,\text{m}) = 9.8 \times 10^4\,\text{J}$$

عند النقطة 3، $y_3 = -15\,\text{m}$؛ لأنّ النقطة 3 أخفض من النقطة 1. لذلك، فإنّ

$$PE_3 = mgy_3 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(-15\,\text{m}) = -1.5 \times 10^5\,\text{J}$$

(ب) إنّ التغيّر في طاقة الوضع $(PE_{final} - PE_{initial})$، عند الانتقال من النقطة 2 إلى النقطة 3 هي:

$$PE_3 - PE_2 = (-1.5 \times 10^5\,\text{J}) - (9.8 \times 10^4\,\text{J})$$
$$= -2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

تقلّ طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض للأجسام بمقدار $2.5 \times 10^5\,\text{J}$.

(جـ) في هذه الحالة، $y_1 = +15\,\text{m}$ عند النقطة 1. لذا، فإنّ طاقة الوضع الابتدائية (عند النقطة 1) هي:

$$PE_1 = (1000\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)(15\,\text{m}) = 1.5 \times 10^5\,\text{J}$$

عند النقطة 2، $y_2 = 25\,\text{m}$. لذلك، فإنّ طاقة الوضع هي:

$$PE_2 = 2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

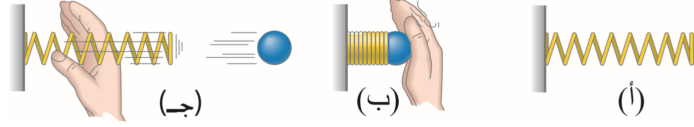
عند النقطة 3، $y_3 = 0$. ولهذا، فإنّ طاقة الوضع تكون صفرًا. التغيّر في طاقة الوضع عن الانتقال من النقطة 2 إلى النقطة 3 هي:

$$PE_3 - PE_2 = 0 - 2.5 \times 10^5\,\text{J} = -2.5 \times 10^5\,\text{J}$$

وهي تمامًا القيمة نفسها كما في البند (ب).

تعريف طاقة الوضع PE على نحو عام

هناك أشكال أخرى لطاقة الوضع، بالإضافة إلى تلك الناتجة من جذب الأرض للأجسام. وترتبط أشكال طاقات الوضع الأخرى جميعها بقوّةٍ ما، ويمكن تعريفها بطريقة مماثلة لتعريفنا للطاقة الناتجة من جذب الأرض للأجسام. وعلى نحو عام، يعادل التغير في طاقة الوضع، الناتج من تأثير قوّةٍ ما، الشغل السالب المبذول بواسطة تلك القوّة إذا انتقل الجسم من نقطةٍ إلى أخرى (كما في المعادلة 6–7 ب للجاذبية) . وبطريقةٍ أخرى، وبناءً على قانون نيوتن الثالث، نستطيع تعريف التغيّر في طاقة الوضع بالشغل اللازم بذله بواسطة قوّةٍ خارجيّة لنقل جسمٍ بلا تسارع بين النقطتين، كما في (المعادلة 6–7 أ).



الشكل 6 - 13 (أ) يستطيع الزنبرك أن يخزن طاقةً مرنةً (PE Elastic) عندما يتمّ ضغطه كما في الشكل (ب)، ويستطيع أن يبذل شغلًا عندما يتحرّك كما في الشكل (جـ).

وهناك شكل آخر لطاقة الوضع يرتبط بالمواد المرنة وله تطبيقاتٌ عمليَّةٌ كثيرةٌ ومختلفة. انظر الآن إلى الزنبرك البسيط في (الشّكل 6–13). يمتلك هذا الزنبرك طاقة وضع ناجمة من ضغطه (أو استطالته)، ويستطيع بذل شغل على الكرة عند إطلاقه كما في الشكل أعلاه. يتطلّب إبقاء الزنبرك مضغوطًا أو غير مضغوطٍ مسافة x، مقارنةً مع طوله الطبيعي الذي يؤثر عليه بقوة F_P، تناسبا طرديّا مع x: أي أنّ

$$F_P = kx$$

حيث k مقدارٌ ثابتٌ يُدعى ثابتَ الإرجاعِ للزنبرك، وهو مقياسٌ لمدى صلابة زنبرك معيّن. يؤثر الزنبرك المضغوط أو المستطال بقوة F_S بالاتّجاه المعاكس لاتجاه اليد المؤثّرة فيه، كما في (الشّكل 6–14):

$$F_S = -kx \qquad \textbf{(8 – 6)}$$

تُعرف هذه القوّة أيضًا "بقوة الإرجاع" نتيجة تأثير قوّة الزنبرك باتجاه معاكس لاتجاه الإزاحة. لذلك ظهرت إشارة السالب في (المعادلة 6–8) معادلة الزنبرك والمسماة أيضًا قانون هوك، وهي معادلةٌ دقيقةٌ وصحيحةٌ طالما بقيت x صغيرة. (أصغر بكثير من طول الزنبرك). ولحساب طاقة وضع زنبرك مستطال، دعنا نحسب الشغل اللازم بذله لإطالته (الشكل 6–14 ب). وقد نرغب في استخدام (المعادلة 6–1) لحساب الشغل المبذول على الزنبرك، $W = Fx$، بحيث تمثل x مقدار استطالته مقارنة مع طوله الطبيعي. إلا أنّ هذا التطبيق المباشر غير صحيح هنا؛ لأنّ القوة $F_P\,(=kx)$ غير ثابتة، بل متغيّرة خلال هذه المسافة، لتبدأ بالزيادة كلّما ازدادت الاستطالة x، كما هو مبين تمثيليًّا في (الشّكل 6–15) ، لذلك سنستخدم متوسط القوّة المؤثّرة، $\bar{F}$. وبما أنّ F_P تتغيّر باستمرار من الصفر (الموضع الابتدائي غير المستطال) إلى kx الموضع النهائي عندما تصبح الاستطالة x، فإنّ متوسّط القوّة هو: $\bar{F} = \frac{1}{2}[0 + kx] = \frac{1}{2}kx$، وتمثّل x مقدار الاستطالة النهائيّة (مبيّنة x_f في الشكل 6–15 للتوضيح). لذلك، يكون الشغل المبذول هو:

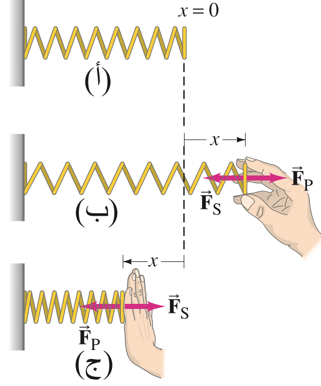
$$W = \bar{F}x = (\tfrac{1}{2}kx)(x) = \tfrac{1}{2}kx^2$$

وعليه، فإنّ طاقة الوضع المرنة تتناسب مع مربّع مقدار الاستطالة كما يلي:

$$\text{(المرنة) } PE = \tfrac{1}{2}kx^2 \qquad \textbf{(9 – 6)}$$

إذا تمّ ضغط زنبرك مسافة x ابتداءً من طوله الطبيعي، فإنّ متوسّط القوّة $F = \frac{1}{2}kx$، ومرّةً أخرى تعطى طاقة الوضع (بالمعادلة 6–9) . لذلك، فإنّ x تمثّل مقدار انضغاط الزنبرك أو استطالته مقارنةً بطول الطبيعي. لاحظ أنّه تمّ اختيار نقطة المرجع بدلالة الطول الطبيعي* للزنبرك لتكون عندها طاقة الوضع مساويةً للصفر.

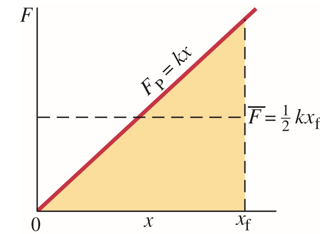
طاقة الزنبرك المرن



الشكل 6 - 14 (أ) الزنبرك في وضعه الطبيعي (غير مستطال). (ب) الزنبرك مستطال بواسطة شخص أثر فيه بقوة $\vec{F}_P$ إلى اليمين (الاتجاه الموجب). يدفع الزنبرك بالاتجاه المعاكس بقوة $\vec{F}_S$، بحيث $F_S = -kx$. (جـ) يضغط شخص الزنبرك $(x < 0)$. تؤثر قوة $\vec{F}_P$ إلى اليسار، ويدفع الزنبرك بالاتجاه المعاكس بقوة $F_S = -kx$، بحيث $F_S > 0$ لأنّ $x < 0$.

المرنة PE

* نستطيع أيضًا الحصول على (المعادلة 6–9)باستخدام (البند 6–2). الشغل المبذول، وكذلك ΔPE، يساوي المساحة تحت منحنى F و x كما في (الشكل 6–15). وتمثّل هذه المساحة مساحة المثلّث الملوّن (الشكل 6–15) الذي ارتفاعه kx وقاعدته x. وعليه، فإنّ مساحة المثلّث تساوي $\frac{1}{2}(kx)(x) = \frac{1}{2}kx^2$.



الشكل 6-15 عندما يُضغط زنبرك (أو يُستطال)، تتزايد القوّة اللازمة لتحفيز هذا التغيّر بدلالة x:
منحنى تغيّر $F = kx$ بدلالة x من $x = 0$ إلى $x = x_f$.

في كلٍّ من الأمثلة السابقة لطاقة الوضع – من حجر البناء المثبت على ارتفاع y، إلى الزنبرك المستطال أو المضغوط – فإنّ كلّ جسم يمتلك القدرة أو إمكانية بذل شغل على الرغم من أنه لم يبدأ بعد ببذل هذا الشغل. تظهر هذه الأمثلة إمكانية تخزين الطاقة؛ لاستخدامها لاحقًا، على شكل طاقة وضع (الشكل 6–13، كمثال على الزنبرك).

لاحظ أنّ هناك معادلةً وحيدةً شاملةً للطاقة الحركيّة الانتقاليّة للجسم $\frac{1}{2}mv^2$، ولا تُوجد معادلة وحيدة شاملة لطاقة الوضع. وبدلًا من ذلك، فإنّ النمط الرياضي لطاقة الوضع يعتمد على طبيعة القوة المرتبطة بها.

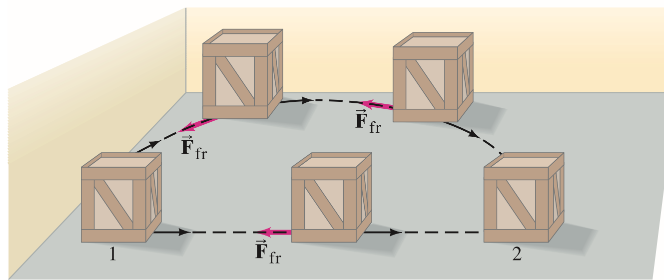
5-6 القوى المحافظة وغير المحافظة

إنَّ الشغل المبذول ضدّ الجاذبيّة الأرضيّة لنقل جسمٍ من نقطةٍ إلى أخرى لا يعتمد على المسار المتبع (المقطوع). وكمثالٍ على ذلك، يتطلّب رفع جسمٍ كتلته m مسافة معيّنة رأسيًّا الشغل نفسه $(= mgy)$ اللازم بذله لحمل ذات الجسم إلى أعلى سطحٍ مائلٍ مرتفعٍ للمسافة الرأسيّة السابقة نفسها، كما في (الشكل 6–4 انظر المثال 6–62). وتُدعى القوى التي تبذل شغلًا يعتمد على الموضعين النهائي والابتدائي فقط للجسم، ولا يعتمد على المسار المتبع، مثل قوّة جذب الأرض للأجسام- **القوى المحافظة**. وتُعدّ قوى الإرجاع في الزنبرك (أو في أيّ مادة مرنة) حيث $F = -kx$، قوى مرنة أيضًا. إنّ الجسم الذي يبدأ من نقطةٍ ما ويعود إلى النقطة نفسها تحت تأثير قوّةٍ محافظةٍ لا يخضع لأيِّ شغلٍ كنتيجةٍ مباشرةٍ لعدم تغيّر طاقة وضعه بعد رحلة الذهاب والإياب التي قطعها.

وعلى الوجه الآخر، تُعدّ قوّة الاحتكاك **غير محافظة** لاعتماد شغلها على المسار المقطوع. وعلى سبيل المثال، عندما يُحرّك صندوق شحن من نقطة على الأرض إلى أخرى، فإنّ الشغل المبذول يعتمد على ما إذا كان المسار المتبع خطًّا مستقيمًا، أو ملتويًا، أم متمايلاً. كما هو مبيّن في (الشكل 6–16)، إذا تمّ دفع صندوق شحن من النقطة 1 إلى النقطة 2 خلال المسار الدائري الأطول بدلًا من المسار المباشر، فسيكون – بالطبع - مقدار الشغل المبذول للتغلّب على الاحتكاك أكبر خلال المسار نصف الدائري الأطول مقارنةً بالمسار المباشر. وهذا مخالف لشغل قوّة الجاذبيّة الأرضيّة. إنّ اتجاه قوّة الاحتكاك هو دائمًا معاكسٌ لاتجاه الحركة. كما أنّ الزاوية θ في (المعادلة 6–1) هي دائمًا $180° = -1$ عند نقاط مسار قوّة الاحتكاك جميعها. لذلك، فإنّ شغل الاحتكاك المبذول كما في (الشكل 6–16) لا يعتمد على النقطتين 1 و 2 فقط. ومن القوى الأخرى غير المحافظة القوى التي يؤثر بها شخصٌ ما، سواء دفعًا أم سحبًا، وكذلك قوّة الشدّ في الحبال (انظر الجدول 6–1).

الجدول 6 – 1
القوى المحافظة وغير المحافظة

القوى المحافظة	القوى غير المحافظة
الجاذبيّة	الاحتكاك
المرنة	مقاومة الهواء
الكهربائيّة	الشد في الحبال
	دفع المحرك أو الصاروخ
	الدفع أو السحب بواسطة شخص ما



الشكل 6–16 تمّ دفع صندوق الشحن على الأرض من الموضع 1 إلى الموضع 2 في مسارين؛ أحدهما مباشر في خطٍّ أفقيٍّ مستقيم، والآخر في مسارٍ دائري. اتجاه قوة الاحتكاك هو دائمًا عكس اتجاه الإزاحة. وعليه، تمتلك قوة الاحتكاك الثابتة مقدارًا يعطى بالمعادلة التالية: $W_{fr} = -F_{fr}d$. لذلك، كلّما زادت المسافة المقطوعة d كما في المسار المائل ازدادت قيمة W. لا يعتمد الشغل المبذول على النقطتين 1 و 2 فقط (البداية والنهاية).

يمكن تعريف طاقة الوضع $_{PE}$ لقوة محافظة فقط.

ليست هناك طاقة وضع $_{PE}$ للاحتكاك.

ولأنّ طاقة الوضع هي طاقة ترتبط بموضع الأجسام أو بترتيبها، فإنّها تكون ذات معنى فقط عندما تحدّد على نحوٍ فريدٍ عند نقطةٍ ما. وهذا ما لا يمكن عمله بوجود قوّةٍ غير محافظة (كالاحتكاك)؛ حيث يعتمد شغلها المبذول على مسارها المتبع (كما في الشكل 6–16). وعليه، يمكن تعريف طاقة الوضع فقط عندما تكون القوّة محافظة.

التمرين جـ: ينتقل جسمٌ متأثّرًا بقوّةٍ ثابتة F من نقطة أولى إلى نقطة أخرى، ومن ثَمَّ يعود إلى النقطة الأولى. فإذا كان الشغل F المبذول على الجسم خلال مساره المغلق 60 J، فهل تستطيع أن تحدّد ما إذا كانت القوّة F المؤثّرة في هذا الجسم خلال مساره المغلق قوّة محافظة أم لا؟

نستطيع الآن أن نُعدِّل على **مبدأ الشغل والطاقة** (الذي نوقش في البند 6–3) لإضافة طاقة الوضع إليه. لنفرض أنّ عدّة قوى تعمل مؤثّرةً في جسمٍ ما قادرٍ على الحركة الانتقاليّة، وأنّ بعض هذه القوى هي قوى

غير محافظة. نكتب الشغل (المحصل) الكلّيّ W_{net} كمجموع لكلٍّ من الشغل المبذول بواسطة القوى المحافظة W_C، والشغل المبذول بواسطة القوى غير المحافظة، W_{NC}:

$$W_{net} = W_C + W_{NC}$$

ومن مبدأ الشغل والطاقة (المعادلة 6 – 4)، يصبح لدينا ما يلي:

$$W_{net} = \Delta KE$$

$$W_C + W_{NC} = \Delta KE$$

حيث $\Delta KE = KE_2 - KE_1$. بعد ذلك

$$W_{NC} = \Delta KE - W_C$$

يمكن كتابة الشغل المبذول بواسطة قوّةٍ محافظةٍ بدلالة طاقة الوضع، مثلما رأينا في (المعادلة 6 – 7 ب) لطاقة وضع الجاذبية :

$$W_C = -\Delta PE$$

وبضمّ المعادلتين الأخيرتين معًا:

مبدأ الشغل و الطاقة (الشكل العام)

$$W_{NC} = \Delta KE + \Delta PE \quad (10 - 6)$$

وعليه، فإنّ الشغل W_{NC} المبذول بواسطة القوى غير المحافظة على جسمٍ ما يعادل التغير الكلي في طاقتي الحركة والوضع.

ويجب التنويه هنا إلى ضرورة إضافة القوى المؤثّرة في الجسم جميعها في (المعادلة 6−10) ، سواء من خلال حدّ طاقة الوضع على يمين المعادلة (إذا كانت القوى محافظة)، أو من خلال حدّ الشغل على اليسار (ولكن ليس من خلال الحدّين!).

6-6 الطاقة الميكانيكيّة وحفظها

إذا كانت القوى المحافظة هي القوى الوحيدة المؤثرة في النظام، فسوف نصل إلى علاقةٍ سهلةٍ وجيّدةٍ للطاقة.

وعندما لا يكون هناك أيّ قوى غير محافظة، فإنّ $W_{NC} = 0$، ويصبح الشكل العام لمبدأ الشغل والطاقة في (المعادلة 6−10) كما يلي:

$$\Delta KE + \Delta PE = 0 \quad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (11 - 6 \text{ أ})$$

أو

$$(KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = 0 \quad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (11 - 6 \text{ ب})$$

نعرف الآن كمية E التي تُسمّى **الطاقة الميكانيكية الكلية** للنظام، وهي مجموع طاقتي الحركة والوضع عند أيّ لحظة:

تعريف الطاقة الميكانيكية الكلية

$$E = KE + PE$$

ونستطيع الآن إعادة كتابة (المعادلة 6 – 11ب) كالتالي:

حفظ الطاقة الميكانيكية

$$KE_2 + PE_2 = KE_1 + PE_1 \quad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (12 - 6 \text{ أ})$$

أو

$$E_2 = E_1 = \text{ثابت} \quad \text{[قوى محافظة فقط]} \quad (12 - 6 \text{ ب})$$

تُعبّر (المعادلات 6 – 12) عن مبدأ مفيد ومحدّد بدقّة للطاقة الميكانيكيّة الكليّة للنظام، وهي أنّها كمية محفوظة. تبقى الطاقة الميكانيكية الكلية ثابتة إذا لم تؤثر أيّ قوى غير محافظة:
$(KE + PE)$ عند زمنٍ ابتدائي 1 تعادل $(KE + PE)$ عند زمنٍ لاحق 2.

ولعرضها بطريقةٍ أخرى، انظر إلى (المعادلة 6 – 11 أ) التي تعطي $\Delta PE = -\Delta KE$؛ أي أنّه إذا زادت الطاقة الحركية KE للنظام، فإنّ طاقة الوضع PE يجب أن تقلّ بمقدارٍ مكافئ. وعليه، فإنّ المجموع الكلّي، $(KE + PE)$ سيبقى ثابتًا:

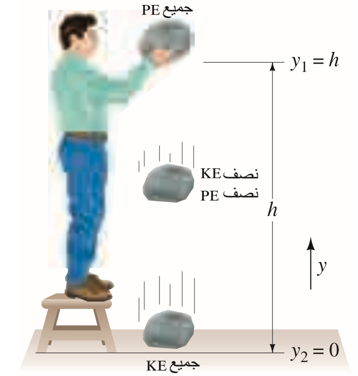
حفظ الطاقة الميكانيكية

إذا كانت القوى المؤثّرة هي قوى محافظة فقط، فإنّ الطّاقة الميكانيكيّة الكلّيّة لا تقلّ ولا تزداد في أيّ عمليّة، بل تبقى ثابتة.

وهذا هو مبدأ **حفظ الطاقة الميكانيكيّة** للقوى المحافظة.

سوف نرى في البند التالي الفائدة الكبيرة لمبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية في حالاتٍ مختلفة، وكيف يُعدّ استخدامها عادة أسهل من استخدام معادلات الحركة أو قوانين نيوتن. وبعد ذلك سنناقش كيفية إضافة أشكال الطاقة الأخرى إلى قانون حفظ الطاقة العام، الذي يشمل الطاقة المرتبطة بالقوى غير المحافظة.

6-7 حلّ مسائل باستخدام حفظ الطاقة الميكانيكيّة



الشكل 6-17 تتغير طاقة الوضع في الصخرة إلى طاقة حركية خلال سقوطها.

يُعدّ سقوط صخرة تحت تأثير الجاذبية من ارتفاع h فوق سطح الأرض مثالًا بسيطًا على حفظ الطاقة الميكانيكيّة (عند إهمال مقاومة الهواء)، كما في (الشكل 6–17). فإذا بدأت الصخرة سقوطها من السكون، فستكون طاقتها الابتدائية كلّها طاقة وضع. وعندما تسقط الصخرة إلى الأسفل، تفقد جزءًا من طاقة وضعها (لأنّ ارتفاعها y يقلّ)، وتزداد طاقتها الحركيّة للتعويض عن نقصان طاقة وضعها؛ بحيث يبقى مجموع الطاقتين مقدارًا ثابتًا. فعند أيّ نقطة خلال المسار، تعطى الطاقة الميكانيكيّة الكليّة كالتالي:

$$E = \text{KE} + \text{PE} = \tfrac{1}{2}mv^2 + mgy$$

حيث تمثل y ارتفاع الصخرة فوق سطح الأرض عند أيّ لحظة، في حين تمثل v سرعتها عند تلك النقطة . وإذا أشرنا إلى الموضع الابتدائي للصخرة بالرقم 1، والموضع عند أيّ لحظة لاحقة بالموضع 2، فسنكتب أنّ:

الطاقة الميكانيكيّة الكليّة عند نقطة 1 = الطاقة الميكانيكيّة الكليّة عند نقطة 2 أو (انظر أيضًا إلى المعادلة 6 – 12أ)

حفظ الطاقة الميكانيكية تحت تأثير الجاذبية الأرضية

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 \quad \text{[فقط الجاذبية وضع طاقة]} \quad \textbf{(13 – 6)}$$

ستتحول طاقة الوضع كاملةً إلى طاقةٍ حركيّةٍ لحظيًّا قبل اصطدام الصخرة بسطح الأرض؛ حيث اخترنا $y = 0$.

المثال 6-8 الصخرة السّاقطة

إذا كان الارتفاع الأصلي للصخرة في (الشكل 6–17) هو $y_1 = h = 3.0\ \text{m}$، فاحسب سرعة الصخرة عندما تسقط إلى ارتفاع 1.0 m فوق سطح الأرض.

النّهج: من الممكن استخدام معادلات الحركة كما في الفصل الثاني كإحدى طرائق الحلّ. وبدلًا من ذلك، سنطبّق مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكيّة (المعادلة 6–13) معتبرين تأثير الجاذبية الأرضية فقط في الصخرة. وسنختار مستوى سطح الأرض كمرجع.

الحلّ: إن موضع الصخرة لحظة سقوطها من السكون من نقطة 1 هو $y_1 = 3.0\ \text{m}$، $v_1 = 0$ ولمعرفة سرعة الصخرة v_2 عندما تصبح على ارتفاع $y_2 = 1.0\ \text{m}$، نعوض في المعادلة 6–13:

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

بحيث تلغي الكتلة بعضها بعضًا من طرفي المعادلة. وعند التعويض بالمعادلة بقيمة $v_1 = 0$، نحصل على:

$$\begin{aligned} v_2^2 &= 2g(y_1 - y_2) \\ &= 2(9.8\ \text{m/s}^2)[(3.0\ \text{m}) - (1.0\ \text{m})] = 39.2\ \text{m}^2/\text{s}^2 \end{aligned}$$

وعليه، فإنّ

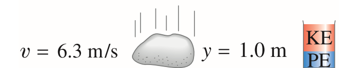
$$v_2 = \sqrt{39.2}\ \text{m/s} = 6.3\ \text{m/s}$$

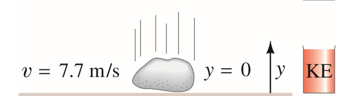
السرعة للصخرة، على ارتفاع 1.0 m فوق سطح الأرض، هي 6.3 m/s باتجاه أسفل التلة.

ملحوظة: لا تعتمد السرعة عند النقطة 2 على كتلة الصخرة.

الشكل 6-18 صناديق الطاقة (في المثال 6–8). طاقة الحركة حمراء وطاقة الوضع زرقاء. المجموع (KE + PE) للنقاط الثلاث ثابت. السرعة عند $y = 0$ لحظيا قبل اصطدام الصخرة بسطح الأرض هي: $\sqrt{2(9.8\ \text{m/s}^2)(3.0\ \text{m})} = 7.7\ \text{m/s}$

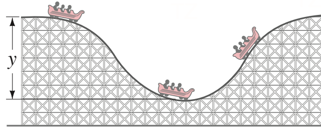






التمرين د: حلّ (المثال 6–8)بتطبيق مبدأ الشغل والطاقة على الصخرة، دون الحاجة إلى استخدام مفهوم طاقة الوضع. بيّن المعادلات المستخدمة جميعها بدءًا من (المعادلة 6–4)، مبيّنًا مفهوم طاقة الوضع.

تُعدّ طريقة "صناديق الطاقة" من أسهل الطرائق للنظر إلى حفظ الطاقة، كما هو مبيّن في (الشكل 6–18). وعلى سبيل المثال، تظهر كلّ من الطاقة الحركية وطاقة الوضع عند كلّ نقطة خلال سقوط الصخرة كمادتين مختلفتين باللون داخل الصندوق، مع بقاء (= الطاقة الميكانيكية الكلية) المحتوى الكلّي المادي للصندوق ثابتًا.



الشّكل 6-19 يوضح عربة أفعوانية تتحرك من غير احتكاك مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية.

نستطيع تطبيق (المعادلة 6−13)على أيّ جسمٍ يتحرّك تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة دون أيّ احتكاك. وعلى سبيل المثال ، يظهر (الشكل 6−19) عربة أفعوانية تبدأ الحركة من السكون عند أعلى نقطة في التلة، لتتسارع بلا احتكاك نحو أسفل المسار، وتكمل الطريق مرتفعةً باتجاه التلة، على الجانب الآخر.* في البداية، كانت العربة تمتلك طاقة وضع فقط خلال انتقالها متسارعةً نحو أسفل المسار، وتفقد طاقة وضعها وتكتسب طاقةً حركيّةً في الوقت ذاته، مع بقاء مجموع الطاقتين ثابتًا، لتصبح طاقة العربة طاقةً حركيّةً فقط عند وصولها إلى أسفل المسار، وهي أعلى طاقةٍ حركيّة يمكن أن تمتلكها العربة. وعندما تبدأ العربة بصعود التلة الأخرى على الجانب الآخر، تبدأ بفقدان طاقتها الحركيّة لتزداد طاقة وضعها. وعندما تتوقف العربة تمامًا، تكون قد فقدت طاقتها الحركيّة واكتسبت طاقة وضع مرة أخرى. وبما أنّ طاقة الوضع تتناسب تناسبًا طرديًّا مع الارتفاع الرأسي، فإنّ مبدأ حفظ الطاقة (عند غياب الاحتكاك) يُخبرنا بأنّ السيارة لا تتوقف تمامًا إلا عندما تصل إلى ارتفاع يعادل الارتفاع الأصلي الذي بدأت الحركة منه. فإذا كان ارتفاع التلتين متساويًا، فستتوقف العربة عندما تكاد تصل الارتفاع نفسه أعلى التّلة الثانية، أمّا إذا كان ارتفاع التلة الثانية أقلّ من ارتفاع الأولى، فلن تتحوّل الطاقة الحركية كلّها التي تمتلكها العربة إلى طاقة وضع، بل سيبقى جزءٌ من هذه الطاقة الحركية للعربة لتكمل الطريق بعد وصولها إلى قمة التلة الثانية، ولربما ستتحرّك إلى أسفل التلّة الثانية مكملةً طريقها. أما إذا كانت التلة الثانية أعلى من الأولى، فسوف تصل العربة إلى ارتفاع عند التلة الثانية يعادل الارتفاع الذي بدأت منه الحركة لتتوقف عنده. وتُعدّ هذه الحالات صحيحة دائما (عند غياب الاحتكاك) مهما كانت شدّة المنحدر لاعتماد طاقة الوضع على الارتفاع الرأسي فقط (المعادلة 6−6).

تعتمد طاقة الوضع الناجمة عن الجاذبية الأرضية على الارتفاع لا على طول المسار (المعادلة 6−6)

المثال 6-9 **السرعة لأفعوانية باستخدام حفظ الطاقة** إذا كان ارتفاع التلّة في (الشّكل 6 − 19) 40 m، في حين تبدأ عربة أفعوانيّة الحركة من وضع السكون في أعلى التلّة. فاحسب: (أ) سرعة العربة عندما تصل أسفل التلة. (ب) الارتفاع التي ستمتلك عنده العربة نصف هذه السرعة. افرض أنّ $y = 0$ عند أسفل التلة.

النّهج: نختار النقطة رقم 1 لتمثّل موضع العربة أولًا عندما بدأت حركتها من الصفر ($v_1 = 0$) عند أعلى التلّة ($y_1 = 40\,\text{m}$)، ونختار مستوى النقطة رقم 2 عند أسفل التلة، حيث $y_2 = 0$.

سوف نستخدم حفظ الطاقة الميكانيكيّة.

الحــلّ: (أ) باستخدام (المعادلة 6−13) حيث $v_1 = 0$ و $y_2 = 0$،

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$
$$mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2$$

وباختصار الكتلة m من طرفي المعادلة، والتعويض $y_1 = 40\,\text{m}$، نحصل على

$$v_2 = \sqrt{2gy_1} = \sqrt{2(9.8\,\text{m/s}^2)(40\,\text{m})} = 28\,\text{m/s}$$

(ب) نستخدم حفظ الطاقة أيضًا

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

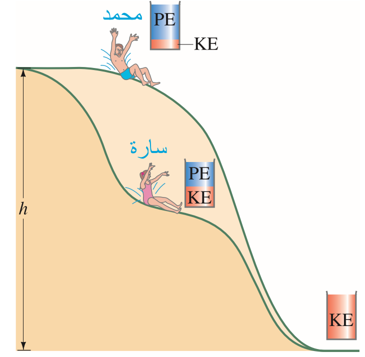
ونعوّض الآن $v_2 = 14\,\text{m/s}$، (نصف السرعة السابقة 28 m/s)، ونحلّ للقيمة المجهولة لـ y_2، ونختصر الكتلة m من طرفي المعادلة السابقة، ثم نضع $v_1 = 0$

$$y_2 = y_1 - \frac{v_2^2}{2g} = 30\,\text{m}:$$

أي أنّ سرعة السيارة ستصبح 14 m/s عندما تصل إلى ارتفاع رأسي يعادل 30 m مقارنةً بأخفض نقطةٍ وهي تهبط من أعلى التلة من الجهة اليسرى، أو وهي تصعد التلة من الجهة اليمنى.

ملحوظة: إنّ طريقة الحساب المتبعة في هذا المثال مطابقة لتلك المتبعة في (المثال 6−8) مع وجود اختلاف جوهري بينهما. كان بالإمكان حلّ (المثال 6−8) باستخدام القوّة، والتسارع، ومعادلات الحركة (المعادلات 2−11). ولكن عندما تكون الحركة رأسية، تصبح هذه الطريقة معقدة جدًّا، في حين يعطي مبدأ حفظ الطاقة الحل بكلّ سهولة.

* القوى المؤثّرة في السيارة هي: قوّة الجاذبيّة، وقوّة دفع السّكة العموديّة، وقوّة الاحتكاك (تمّ افتراضها صفرًا). تعمل القوّة العموديّة دائمًا باتجاهٍ عموديٍّ على اتجاه الحركة. لذا، فهي لا تبذل أيّ شغل. لذلك، فإنّ $W_{NC} = 0$ في (المعادلة 6 − 10) ، (الطاقة الميكانيكيّة تكون محفوظة) ويمكن استخدام (المعادلة 6 − 13) لتكون طاقة الوضع ناجمة عن الجاذبيّة فقط. وسوف نرى كيفيّة التعامل مع الاحتكاك عندما تكون $W_{NC} \neq 0$، في (البند 6 − 9).



الشكل 6-20 المثال 6-10

المثال المفاهيمي 6-10 **السرعات على انزلاقين مائيّين.** منزلقان مائيان لهما الطول نفسه ويبدآن من الارتفاع h نفسه، ولكن لكلّ منهما مسار مختلف عن الآخر (الشكل 6-20). إذا بدأ متسابقان، محمد وسارة، بالانزلاق من السكون في آن واحد كلٌّ من مسار مختلف، فأيّ المتسابقين: (أ) سيتحرك بسرعةٍ أعلى عند أسفل المنزلق؟ (ب) سيصل إلى الأسفل أولاً؟ أهمل الاحتكاك.

النّهج: (أ) ستتحول طاقة الوضع الابتدائية mgh لكلّ متسابق إلى طاقة حركية، بحيث نحصل على السرعة v عند الأسفل من العلاقة $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$. وبعد اختصار الكتلة من طرفي المعادلة، نحصل على السرعة النهائية لتكون هي نفسها لكلا المتسابقَيْن عند أسفل المنحدر؛ لأنّ كلًّا منهما بدأ الحركة من الارتفاع الرأسي نفسه.

(ب) لاحظ أنّ موضع سارة الرأسي هو أسفل موضع محمد عند كلّ لحظة، وعلى كلّ ارتفاع حتى النهاية. وهذا يدلّ على أنّ طاقة وضع سارة قد تحولت إلى طاقة حركية قبل محمد عند كلّ لحظة. لذا، فهي تتحرك بسرعة أعلى من سرعة محمد خلال الرحلة كاملة، ما عدا قرب نهاية المسار، التي يتساوى عندها سرعة كلٍّ منهما. وبما أنّ سارة تتحرك بسرعة أعلى خلال معظم الرحلة، فمن المتوقع أن تصل أسفل المسار أولًا.

التمرين هـ: تُركت كرتان لتسقطان من الارتفاع نفسه. إذا سقطت الكرة أ سقوطًا حرًّا خلال الهواء، وانزلقت الكرة ب على سطح أملس مائل باتّجاه سطح الأرض، فما سرعة كلٍّ من الكرتين مقارنة ببعضهما لحظة وصولهما إلى سطح الأرض؟

حلّ الأسئلة:
أيهما نستخدم: الطاقة أم قوانين نيوتن؟

يتمّ التساؤل أحيانًا عن مدى جدوى استخدام مبدأ الشغل والطاقة عند تناول مشكلة المقارنة مع قوانين نيوتن. فعندما تكون القوة ثابتةً، يمكن استخدام أيٍّ من الطريقتين من حيث المبدأ. أمّا عندما تكون القوى غير ثابتة أو أنّ المسار معقد، فيصبح استخدام مبدأ حفظ الطاقة الطريقة الفضلى للحلّ.

تطبيق الفيزياء في الرياضة

هنالك أمثلةٌ كثيرةٌ مهمّةٌ من الألعاب الرياضية التي يمكن تناولها لشرح مبدأ حفظ الطاقة. وعلى سبيل المثال عصا القفز العالي المبينة في (الشكل 6-21) . ونحن على الأغلب نلجأ إلى التقريبات، ومع هذا، فإنّ تسلسل الأحداث لعصا القفز العالي هي غالبًا كالتالي: تتحوّل طاقة الرياضي الحركيّة الابتدائيّة الناجمة عن ركضه إلى طاقة وضعٍ مرنةٍ في عصا القفز المعوجّة لتتحوّل بعد ذلك إلى طاقة وضعٍ جاذبيّةٍ عند ارتفاع اللاعب عن سطح الأرض. وعندما يصل اللاعب القافز إلى أعلى نقطة لحظة اعتدال عصا القفز، تكون الطاقة جميعها قد تحوّلت إلى طاقة وضعٍ ناجمةٍ من الجاذبية الأرضية (عند إهمال سرعة القافز الأفقيّة الضئيلة فوق العمود الأفقي).

لا تُعدّ عصا القفز مصدرًا لأيّ طاقة، ولكنها تعمل كجهاز لتخزين الطاقة والمساهمة في تحويل الطاقة الحركيّة إلى طاقة وضع (نتيجة الجاذبية الأرضية) وهي النتيجة المحصلة. وتعتمد الطاقة اللازمة للعبور فوق العمود الأفقي على مدى ارتفاع مركز ثقل (CM) اللاعب القافز. فعندما يثني الرياضي القافز جسده، فإنّه يعمل على إبقاء مركز ثقله منخفضًا للدرجة التي يستطيع عندها إرغام مركز الثقل على العبور أسفل العمود الأفقي العلوي مباشرة (الشكل 6-22)، ليتمكن من العبور فوق العمود مباشرة، حيث لا يمكن له القفز فوقه دون ثني جسده بتلك الطريقة (سيغطي مركز الثقل في الفصل السابع).

الشكل 6–21 تحول الطاقة خلال القفز بالعصا.





الشكل 6–22 يستطيع قافزو العصي الطويلة عند ثني أجسادهم إبقاء مراكز ثقلهم منخفضة إلى درجة تبقيها أسفل عمود القفز الأفقي. ويستطيع الرياضيون القفز فوق الأعمدة الأفقية المرتفعة عند تحويل طاقاتهم الحركية المكتسبة نتيجة الركض إلى طاقات وضع ناتجة من الجاذبية الأرضية، ($=mgh$) حيث لا يمكنهم القفز فوقها دون ثني أجسادهم خلال القفز.

وكمثال آخر على حفظ الطاقة الميكانيكيّة، دعنا نتناول جسمًا كتلته m موصول بزنبركٍ أفقيٍّ مهملَ الكتلة وثابتًا صلابته k. إذا كانت سرعة الكتلة m عند أيّ لحظة هي v، وطاقة وضع النظام (الجسم والزنبرك معا) معطاة (بالعلاقة 6–9) ، $\text{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، حيث تمثل x إزاحة الزنبرك عن وضع الاتزان، فإنّ حفظ الطاقة الميكانيكيّة عند إهمال قوّة الاحتكاك وأيّ قوّةٍ أخرى تخبرنا بالتالي:

حفظ الطاقة الميكانيكية عندما تكون طاقة الوضع مرنة

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 \qquad \text{[PE فقط المرنة]} \quad \textbf{(14–6)}$$

حيث إن 1 و 2 تعودان إلى السرعة والإزاحة عند لحظتين مختلفتين.

المثال 6-11 مسدس لعب الأطفال

ضُغط زنبرك مسدّس لعبة أطفال (ثابت صلابته $k = 250\ \text{N/m}$) مسافة $6.0\ \text{cm}$ بسهم مطاطي كتلته $0.100\ \text{kg}$، ثم تُرك كما هو مبيّن في (الشكل 6–23 أ). ما السرعة التي سيصل إليها السّهم المطاطيّ عند تحرره من الزنبرك لحظة رجوع هذا الزنبرك إلى طوله في حالة الاسترخاء ($x = 0$)؟

النّهج: إنّ السّهم المطاطيّ كان ساكنًا بداية (النقطة - 1). لذلك، فإنّ $\text{KE}_1 = 0$. وعند إهمال الاحتكاك، وباستخدام حفظ الطاقة الميكانيكيّة، فإنّ طاقة الوضع الوحيدة هي طاقة المرونة.

الحلّ: باستخدام (المعادلة 6–12) عند النقطة 1 لحظة انضغاط الزنبرك لقيمته القصوى حيث $v_1 = 0$، (لم يبدأ السّهم المطاطيّ بالحركة بعد) عند $x_1 = -0.060\ \text{m}$. تمّ اختيار النقطة 2 لحظة انطلاق السّهم المطاطيّ، كما في (الشّكل 6–23 ب) ، حيث $x_2 = 0$، وتحدّد قيمة v_2 من (المعادلة 6–14) كالتالي:

$$0 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

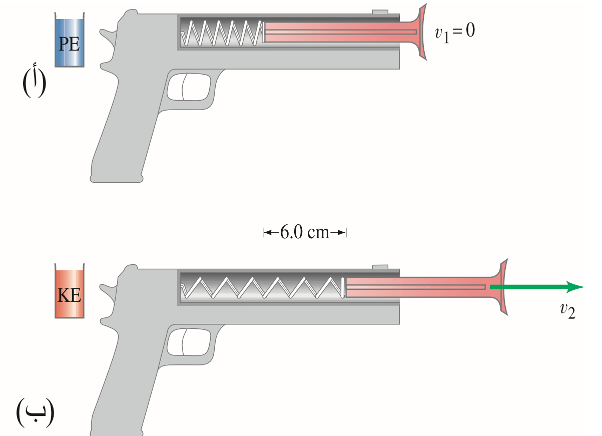
لذلك

$$v_2^2 = \frac{kx_1^2}{m}$$

$$= \frac{(250\ \text{N/m})(-0.060\ \text{m})^2}{(0.100\ \text{kg})} = 9.0\ \text{m}^2/\text{s}^2$$

وعليه: $v_2 = \sqrt{v_2^2} = 3.0\ \text{m/s}$

ملحوظة: إنّ القوة الوحيدة المؤثّرة في السّهم المطاطيّ بالاتجاه الأفقيّ (وعند إهمال الاحتكاك) هي قوّة الزنبرك. أمّا في الاتجاه الرّأسيّ، فإنّ قوّة جذب الأرض تمّت معادلتها بالقوّة العموديّة المؤثّرة في السّهم بواسطة أسطوانة المسدّس. وعند مغادرة السّهم المطاطيّ لأسطوانة المسدّس أخيرًا ، فإنّها ستتبع مسار مقذوفٍ يتحرّك تحت تأثير الجاذبية الأرضية.



الشّكل 6 – 23 المثال 6 - 11 (أ) سهم مطاطيّ تمّ دفعه ليعمل على ضغط الزنبرك مسافة 6.0 cm، ثم تُرك السّهم، وفي (ب) ينطلق السّهم مغادرا الزنبرك بسرعة v_2.

مثال إضافي

يبين المثال التالي كيفيّة حلّ معضلةٍ تتضمّن نوعين من طاقة الوضع.

المثال 6-12 **نوعان من طاقة الوضع (PE).**

تسقط كرةٌ كتلتها $m = 2.60\,\text{kg}$ من السكون من ارتفاع رأسي $h = 55.0\,\text{cm}$ لتصطدم بزنبرك، وتضغطه مسافة $Y = 15.0\,\text{cm}$ كما في (الشّكل 6–24). حدّد مقدار معامل صلابة الزنبرك (اهمل كلًّا من مقاومة الهواء وكتلة الزنبرك).احسب المسافات جميعها بالنسبة إلى النقطة الأولى التي تلامس عندها الكرةُ الزنبركَ غير المضغوط (افترض تلك النقطة عند $y = 0$).

النّهج: إنّ القوّتين المؤثّرتين في الكرة هما قوّة جذب الأرض وقوّة الزنبرك المرنة. وبما أنّ القوّتين محافظتان، فإنّنا نستطيع استخدام حفظ الطاقة الميكانيكية بما فيها نوعي طاقة الوضع. ومع هذا فيجب أن نكون حذرين؛ لأنّ طاقة الوضع نتيجة جذب الأرض تؤثّر في الكرة خلال سقوطها (الشكل 6–24)، في حين تبدأ قوّة الزنبرك المرنة بالتأثير في الكرة فقط عند ملامسة الكرة للزنبرك (الشكل 6–24 ب). نختار الاتجاه الصّاديّ الموجب إلى أعلى لتكوّن $y = 0$ عند نهاية الزنبرك في حالة الاسترخاء.

الحلّ: يتم تقسيم الحلّ إلى جزأين (هناك طريقة أخرى للحلّ سيتم عرضها لاحقًا).
الفرع 1: دعنا أولًا نتناول التغيّر في الطاقة خلال سقوط الكرة من ارتفاع $y_1 = h = 0.55\,\text{m}$، كما في (الشكل 6–24 أ) إلى $y_2 = 0$ لحظة ملامستها للزنبرك، كما في (الشكل 6–24ب). إنّ نظامنا يتكوّن من الكرة الساقطة تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة والزنبرك الذي لا يقوم بأيّ عمل حتى هذه اللحظة. وعليه، فإنّ

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2$$

$$0 + mgh = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

ولإيجاد السرعة $v_2 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(9.80\,\text{m/s}^2)(0.550\,\text{m})} = 3.283\,\text{m/s} \approx 3.28\,\text{m/s}$

وهي سرعة الكرة لحظة ملامستها أعلى الزنبرك (الشكل 6–24 ب).
الفرع 2: ماذا يحدث عندما تضغط الكرة الزنبرك؟ (الشكل 6–24 ب و ج) حيث إنّ الكرة تخضع لقوّتين محافظتين في هذه الحال، هما قوّة جذب الأرض وقوّة الارجاع في الزنبرك. لذا، فإنّ معادلة حفظ الطاقة تصبح كالتالي:

$$E\ (\text{عند ملامسة الكرة للزمبرك}) = E\ (\text{عند انضغاط الزمبرك})$$

$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 + \tfrac{1}{2}ky_2^2 = \tfrac{1}{2}mv_3^2 + mgy_3 + \tfrac{1}{2}ky_3^2$$

حفظ الطاقة: الجاذبية والمرونة

لقد تمّ اعتبار النقطة 2 اللحظة التي تلامس الكرة عندها الزنبرك؛ أي أنّ $y_2 = 0$ و $v_2 = 3.283\,\text{m/s}$، (محتفظين بخانة إضافيّة إلى الآن). وتمّ اعتبار النقطة 3 اللحظة التي تتوقف عندها الكرة تمامًا في حين يكون الزنبرك منضغطًا تمامًا. وعليه، فإنّ $v_3 = 0$، و $y_3 = -Y = -0.150\,\text{m}$ (معطاة). وبالتعويض في معادلة الطاقة أعلاه نحصل على

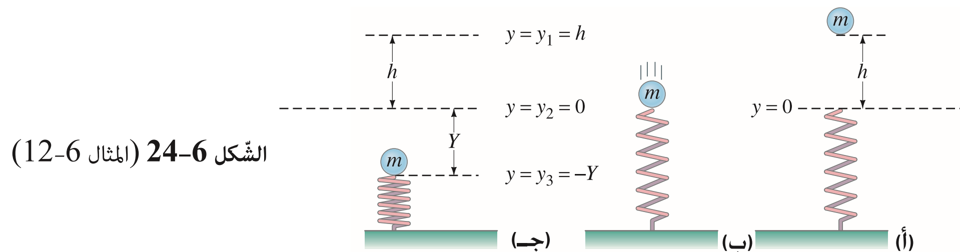
$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 + 0 + 0 = 0 - mgY + \tfrac{1}{2}kY^2$$

وبمعرفة كلّ من m, v_2 و Y، نستطيع حلّ المعادلة للحصول على k:

$$k = \frac{2}{Y^2}\left[\tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgY\right] = \frac{m}{Y^2}\left[v_2^2 + 2gY\right]$$

$$= \frac{(2.60\,\text{kg})}{(0.150\,\text{m})^2}\left[(3.283\,\text{m/s})^2 + 2(9.80\,\text{m/s}^2)(0.150\,\text{m})\right] = 1590\,\text{N/m}$$

وهي النتيجة التي سعينا إليها.



الشّكل **6-24** (المثال 6-12)

حلّ الأسئلة:

طرق حلّ بديلة

طريقة حلّ بديلة: من الممكن الوصول إلى الحلّ بصورةٍ مباشرةٍ خطوةٍ واحدةٍ بدلًا من تقسيم الحلّ إلى جزأين. على أيّ حال، نحن من يحدد أيّ النقطتين سيتمّ تعويضهما على يسار معادلة الطاقة ويمينها. سنختار النقطتين 1 و 3 ونعوضهما في معادلة الطاقة (الشكل 6–24) حيث إنّ النقطة 1 هي النقطة الابتدائية قبل أن تبدأ الكرة بالسقوط مباشرة (الشّكل 6–24 أ)، $v_1 = 0, y_1 = h = 0.550\ \text{m}$، والنقطة 3 هي عندما ينضغط الزنبرك تماما (الشّكل 6–24 ج)، حيث $v_3 = 0, y_3 = -Y = -0.150\ \text{m}$. إنّ القوتين المؤثرتين في الكرة في هذه الحالة هما قوّة جذب الأرض (على الأقل لجزء من الوقت) وقوة الزنبرك. لذلك، فإنّ حفظ الطاقة يخبرنا بالتالي:

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 + \tfrac{1}{2}k(0)^2 = \tfrac{1}{2}mv_3^2 + mgy_3 + \tfrac{1}{2}ky_3^2$$
$$0 \quad + mgh + \quad 0 \quad = \quad 0 \quad - mgY + \tfrac{1}{2}kY^2$$

حيث عرضنا $y = 0$ للزنبرك عند النقطة 1 لعدم تأثّره في تلك اللحظة سواء انضغاطًا أو استطالةً. وتصبح قيمة k عن طريق الحلّ كالتالي:

$$k = \frac{2\,mg(h + Y)}{Y^2} = \frac{2(2.60\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(0.550\ \text{m} + 0.150\ \text{m})}{(0.150\ \text{m})^2} = 1590\ \text{N/m}$$

وهو الحل نفسه باستخدام الطريقة الأولى.

8-6 أشكال أخرى للطاقة، وتحوّلات الطاقة، وقانون حفظها

يمكن تعريف أشكال أخرى للطاقة، إضافةً إلى كلٍّ من الطاقة الحركيّة وطاقة الوضع. تُعدّ كلٌّ من الطّاقة الكهربائيّة، والطّاقة النوويّة، والطّاقة الحراريّة، والطّاقة الكيميائيّة المخزّنة في الغذاء أو الوقود أمثلة على هذه الأشكال الأخرى للطاقة. ومع تطور النظريّة الذريّة، أصبح يُنظر إلى هذه الأشكال الأخرى للطاقة على أنّها طاقة وضع، أو طاقةٌ حركيّةٌ على المستوى الذرّي أو الجزيئي. فعلى سبيل المثال، وبناءً على النظرية الذريّة، فإنّ الطاقة الحراريّة ما هي إلا طاقة حركية للجزيئات المتحركة بسرعاتٍ عالية — ترتفع سرعات الجزيئات المكوّنة لجسم ما نتيجة تسخين الجسم. إلى جانب أنّ الطاقة المخزنة في الطعام والوقود هي طاقة وضع ناجمة من مواضع الذّرات داخل الجزيئات بالنسبة إلى بعضها بعضًا، وناجمة كذلك من القوى الكهربائية المتبادلة بين الذرات (عادةً ما تُعرف بالروابط الكيميائية). ولكي تتم الاستفادة من الطاقة المخزّنة في الروابط الكيميائيّة لإنجاز شغلٍ ما؛ يجب أن تتحرّر هذه الطاقة، وعادةً ما يتم ذلك من خلال التفاعلات الكيميائية. وهذا شيءٌ مماثلٌ للشغل الذي يمكن بذله بواسطة زنبركٍ مضغوط عند تحركه. ويمكن أيضًا افتراض كلٍّ من الطاقة الكهربائيّة والمغناطيسيّة والنوويّة أمثلةً على الطاقتين الحركيّة والوضع (المخزنة). وسوف نتعامل مع هذه الأشكال الأخرى للطاقة في الفصول القادمة. فمن الممكن أن تتحول الطاقة من شكل إلى آخر، وقد ناقشنا عدّة أمثلةٍ على ذلك حتى الآن، نذكر منها أنّ طاقة الصخرة المعلقة عاليًا في الهواء هي طاقة وضع؛ وتبدأ هذه الطاقة بالتناقص كلّما هوت الصخرة إلى الأسفل باتجاه سطح الأرض؛ أي كلّما قلّ ارتفاعها. وفي الوقت نفسه، فإنّ الصخرة تكتسب طاقة حركة نتيجة تسارع الصخرة باتجاه سطح الأرض وازدياد سرعتها. وبهذا، فإنّ طاقة الوضع تكون قد تحولت إلى طاقة حركة.



الشكل 6–25 طاقة وضع القوس المثني تكاد تتحول إلى طاقة حركية في السهم.

غالبًا ما يتم انتقال الطاقة من جسم إلى آخر خلال عمليّة تحولها. فقد كان ذلك جليًّا عند تحوّل طاقةِ الوضع المخزّنة في الزنبرك (الشكل 6–13 ب) إلى طاقةٍ حركيّةٍ للكرة (الشكل 6–13 جـ). إنّ الماء المخزّن خلف سدٍّ يمتلك طاقة وضعٍ يمكن أن تتحوّل إلى طاقة حركية نتيجة تساقط المياه. ومن الممكن تحويل الطاقة الحركيّة مرةً أخرى إلى شكلٍ آخر للطاقة، كالطاقة الكهربائيّة من خلال تمرير المياه عند قاعدة السّدّ على شفرات مولد، كما سنرى في الفصول اللاحقة. كما أنّ طاقة الوضع المخزنة في القوس عند ثنيه ستتحوّل إلى طاقةٍ حركية في السهم (الشكل 6–25).

يبذل الشغل عند انتقال الطاقة من جسم إلى آخر.

في كلّ مثالٍ من هذه الأمثلة السابقة، كان هناك مقدار من الشغل المبذول مصاحبًا لعملية التحوّل في الطاقة. فالزنبرك في (الشّكل 6–13) بذل شغلًا على الكرة، في حين بذلت المياه شغلا على فراشات المولد، أمّا القوس فيبذل شغلًا على السّهم. إنّ هذه الملحوظة تعمق فهمنا للعلاقة التي تربط الشغل بالطاقة؛ فهناك شغلٌ يُبذل نتيجة انتقال الطاقة من جسم إلى آخر*. يزوّدنا الشخص الذي يقذف كرةً أو يدفع عربة المشتريات بمثال آخر. ونخلص من هذا إلى أنّ الشغل المبذول هو النتيجة الحتميّة لانتقال الطاقة من الشخص (هذه الطاقة مشتقّة من الطاقة الكيميائيّة في الطعام) إلى الكرة أو عربة المشتريات.

* إذا كانت الأجسام عند درجات حرارة مختلفة، فيمكن للحرارة أن تتدفق بين هذه الأجسام، إضافةً إلى انتقال الطاقة بينها أو بدلا من ذلك. (انظر الفصلين 14 و15) .

إنّ إحدى أهم النتائج في الفيزياء، أنه عند انتقال الطاقة أو تحولها، لا يتمّ فقدان أيّ مقدارٍ منها أو اكتسابه خلال تلك العملية. وإذا كان هذا هو الوضع، فنكون قد وصلنا إلى فحوى قانون حفظ الطاقة الذي يُعدّ من أهم المبادىء في الفيزياء، ويمكن صياغة هذا القانون كالتالي:

قانون حفظ الطاقة

يمكن أن تتحول الطّاقة في أيّ عمليّةٍ من شكل إلى آخر، أو تنتقل من جسم إلى آخر، بحيث لا تزداد ولا تنقص. ويبقى مقدارها الكلّيّ ثابتًا دون تغيّر.

لقد ناقشنا حفظ الطاقة للأنظمة الميكانيكيّة بوجود قوًى محافظة، ورأينا كيف يمكن اشتقاقها بناءً على قوانين نيوتن. وهنا تظهر أهميّة قانون حفظ الطاقة الذي يمكن تطبيقه استنادًا إلى الملاحظات العمليّة بوجود أنواع الطاقة جميعها بما فيها غير المحافظة أو الناجمة من قوًى غير محافظة، مثل قوى الاحتكاك. ومع أنّ قوانين نيوتن غير قادرةٍ على الصمود في عالم الذرات عند الأبعاد المتناهية في الصغر، فإنّ قانون حفظ الطاقة أثبت صلاحيّته وإمكانيّة تحقيقه عمليًا في التجارب جميعها وتحت مختلف الظروف.

9-6 حفظ الطاقة بوجود قوى مبدّدة: حلول مسائل

لقد أهملنا الاحتكاك (قوّة غير محافظة) عندما تكلّمنا عن تطبيقات حفظ الطاقة في (البند السابق 6−7) . ومع هذا، فهناك حالاتٌ كثيرةٌ لا يمكن إهمال الاحتكاك عند تناولها. فعلى أرض الواقع وعلى سبيل المثال في (الشكل 6-19) ، لن تستطيع العربة الأفعوانيّة العودة إلى الارتفاع نفسه الذي بدأت الحركة عنده نتيجة الاحتكاك. ففي هذه الحالة، وفي حالاتٍ طبيعيّة أخرى، لا تبقى الطاقة الميكانيكيّة (مجموع طاقتي الحركة والوضع) ثابتة، بل تتناقص بسبب تأثير قوى الاحتكاك.

قوى مبدّدة

ومع بقاء مقدار الطاقة الكلّي ثابتًا، فقد سُميّت هذه القوى **بالقوى المبدّدة**. ومن ناحية تاريخية، فإنّ وجود القوى المبدّدة عمل على تأخير الوصول إلى قانون حفظ الطاقة الكليّة حتى منتصف القرن التاسع عشر. وكان ذلك نتيجة التأخّر في فهم الحرارة وتفسيرها على أنّها شكلٌ من أشكال الطاقة الناجمة من الاحتكاك (حاول دلك يديك ببعضهما بعضًا). أوضحت دراسات كمّيّة قام بها علماء القرن التاسع عشر (تمّ تناولها في الفصلين الرابع عشر والخامس عشر) أنّه إذا اعتبرت الحرارة انتقالاً للطاقة (طاقة حرارية)، فإنّ الطاقة الكليّة محفوظةٌ في أيّ عمليّة. ومثال ذلك، إذا كانت العربة الأفعوانيّة في (الشكل 6−19) معرّضة لقوى الاحتكاك، فستصبح طاقتها الكلّيّة الأوليّة مكافئة لكلٍّ من طاقتها الحركيّة وطاقة وضعها عند أيّ موضعٍ لاحقٍ خلال مسارها، إضافةً إلى مقدار الطاقة الحرارية المولّدة خلال المسار. إنّ الطاقة الحراريّة المولّدة خلال المسار بواسطة قوة الاحتكاك الثابتة F_{fr} تعادل الشغل المبذول نتيجة الاحتكاك. نطبق الآن القانون العام لمبدأ الشغل والطاقة، (المعادلة 6−10) :

$$W_{\text{NC}} = \Delta\text{KE} + \Delta\text{PE}$$

نستطيع كتابة $W_{\text{NC}} = -F_{\text{fr}}\,d$، حيث إن d هي المسافة المقطوعة خلال فترة تأثير قوّة الاحتكاك ($\vec{\mathbf{F}}$ و $\vec{\mathbf{d}}$ في اتجاهين متعاكسين، وعليه تظهر الضرورة لوجود الإشارة السالبة). باستخدام $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ و $\text{PE} = mgy$، فإنّ

$$-F_{\text{fr}}\,d = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_2 - mgy_1$$

أو

حفظ الطاقة تحت تأثير الجاذبية والاحتكاك

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 + F_{\text{fr}}\,d \quad \text{[الاحتكاك والجاذبيّة من كلّ تأثير]} \quad (15-6)$$

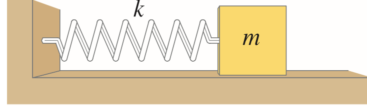
علمًا بأنّ d هي المسافة التي قطعتها خلال مسارها بين النقطتين 1 و 2. ويمكن رؤية (المعادلة 6−15) على أنها (المعادلة 6−13) المعدّلة والمحتوية على الاحتكاك. ويمكن تفسيرها بصورةٍ مبسّطةٍ كما يلي: تعادل الطاقة الميكانيكيّة الأولية للعربة (عند النقطة 1) كلًّا من الطاقة الميكانيكيّة (المخفضة) النهائيّة للعربة، والطاقة المتحوّلة بواسطة الاحتكاك إلى طاقة حراريّة.

عندما نأخذ الطاقات الأخرى بالحسبان، ونعمل على إدخالها في الحساب، مثل الطاقة الكيميائية والكهربائية، سنجد أنّ الطاقة الكليّة هي كميّة محفوظة دائمًا. وعليه، يمكن الجزم بعالمية قانون حفظ الطاقة.

الشغل والطاقة مقابل حفظ الطاقة

يُعدّ مبدأ الشغل والطاقة مكافئًا لقانون حفظ الطاقة. والفارق الوحيد بينهما هو طريقة استخدام كلٍّ منهما، وتحديدًا طريقة اختيار النظام المدروس. فعندما يبذل مؤثّر خارجيٌّ شغلًا ما على النظام الذي تم اختياره (المكون من جسيم واحد أو أكثر)، يجب استخدام مبدأ الشغل والطاقة: الشغل المبذول بواسطة القوى الخارجية على النظام يعادل التغيّر الكلّي في طاقة النظام المختار.

وعلى الوجه الآخر، إذا تمّ اختيار نظام لا يتأثّر بأيّ قوًى خارجيّة ولا يُبذل عليه شغل، فإنّنا نستطيع تطبيق قانون حفظ الطاقة على هذا النظام.



الشكل 6-26 زنبرك مرتبط بمكعب على سطح طاولة أملس. إذا اخترت النظام ليتكون من مكعب وزنبرك، فإن، $E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$؛ أي أن طاقة النظام محفوظة.

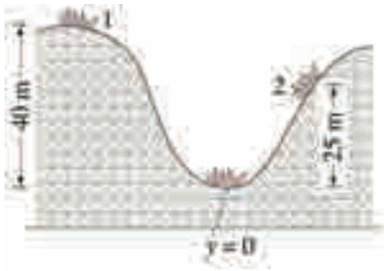
لنتناول على سبيل المثال، زنبركًا مرتبطًا بمكعب موضوع على سطح طاولة أملس (الشكل 6−26) . عند اختيار المكعب كنظام، فإن الشغل المبذول على المكعب بواسطة الزنبرك يعادل التغيّر في طاقة المكعب الحركيّة اعتمادًا على مبدأ الشغل والطاقة. (لاحظ أن قانون حفظ الطاقة لا ينطبق على هذا النظام؛ لأنّ طاقة المكعب متغيّرة). أمّا إذا تمّ اختيار نظام مكوّن من زنبركٍ ومكعبٍ، فيترتّب على ذلك عدم وجود قوًى خارجيّة قادرة على بذل شغل على النظام (أصبح الزنبرك جزءًا من النظام). ومع هذا، يمكن تطبيق قانون حفظ الطاقة على هذا النظام: عندما يتم ضغط الزنبرك، ثم تحريره، فإنّ الزنبرك يبقى قادرًا على التأثير في المكعب بقوّة. ونستطيع التعبير عن الحركة الناتجة من ذلك بدلالة كلٍّ من طاقتي الحركة ($\frac{1}{2}mv^2$) والوضع ($\frac{1}{2}kx^2$). علمًا بأنّ مجموع الطاقتين سيبقى ثابتا. وينطبق قانون حفظ الطاقة على أيّ نظام معزول أو أيّ نظامٍ لا يتأثّر بأيّ قوًى خارجيّة قادرة على بذل شغل عليه.

طريقة حل المسائل: حفظ الطاقة

1. **ارسم صورة** لحالة النظام الطبيعية.
2. **حدّد النظام** ذا الطاقة المحفوظة: الجسيم أو الجسيمات والقوى المؤثرة.
3. **اسأل نفسك** عن الكمية التي تبحث عنها، وقرر موضع كلٍّ من نقطتي **البداية** (1) **والنهاية** (2).
4. إذا تغيّر ارتفاع الجسم خلال فترة دراستك له، **فاختر إطارًا مرجعيًا** يسهّل التعامل معه لتكون عنده $y = 0$ بالنسبة إلى طاقة الوضع الناتجة من الجاذبيّة الأرضيّة، عادةً ما تكون أخفض نقطةٍ هي الخيار المناسب. أما إذا كان النظام يحتوي على زنبرك أو أكثر ، فإنّ موضع الزنبرك غير المستطال هو الخيار المناسب حيث (y أو) $x = 0$
5. **طبق حفظ الطاقة**. وفي غياب الاحتكاك أو أيّ قوة غير محافظة أخرى، فإنّ الطاقة الميكانيكيّة تكون محفوظة: $KE_1 + PE_1 = KE_2 + PE_2$ أمّا إذا وجدت أيّ قوّةٍ غير محافظةٍ ومن ضمنها قوّة الاحتكاك، فتصبح الحاجة ماسّة إلى وجود حدٍّ آخر (W_{NC}):
$$W_{NC} = \Delta KE + \Delta PE.$$
عليك استخدام حسّك لمعرفة ما إذا كان W_{NC} موجبًا أو سالبًا بناءً على إجابتك عن التساؤل الآتي: هل زادت الطاقة الميكانيكيّة الكليّة أم تناقصت نتيجة هذه العمليّة؟
6. استخدم المعادلة (المعادلات) التي طوّرتها **لإيجاد** الكميّة المجهولة.

المثال 6-13 احتكاك على الأفعوانية

تصل العربة الأفعوانية في (المثال 6−9)إلى ارتفاع رأسي مقداره 25 m فقط أعلى التلّة الثانية قبل أن تتوقف تمامًا لوهلة (الشكل 6−27) . إذا قطعت العربة مسافة 400 m، فقدّر متوسّط قوّة الاحتكاك (على افتراض أنها ثابتة) للعربة ذات الكتلة 1000 kg.



الشكل 6 − 27 (المثال 6 − 13) لا تستطيع العربة الأفعوانية الوصول إلى الارتفاع الأصلي فوق التلة الثانية بسبب الاحتكاك.

النهج: سنتتبع النهج المقترح خطوة خطوة.

الحل:

1. ارسم صورة. (انظر الشكل 6−27) .

2. النظام. يتكوّن النظام من العربة الأفعوانية (والأرض التي تؤثّر بقوّة جذب). القوتان المؤثرتان في العربة هما قوتا الاحتكاك وجذب الأرض. (تؤثّر القوّة العموديّة في العربة أيضًا، ولكنّها لا تبذل أيّ شغلٍ. لذا، فهي لا تؤثّر في الطاقة).

3. اختيار موضعي البداية والنهاية. تختار النقطة 1 لحظة بدء العربة بالحركة (عند أعلى التلّة الأولى)، والنقطة 2 لحظة توقف العربة على مسافة 25 m أعلى التلّة الثانية.

4. اختيار إطار مرجعي. تختار أخفض نقطة $y = 0$ لتكون طاقة الوضع الناتجة من جذب الأرض عندها مساوية للصفر.

5. تطبيق حفظ الطاقة. بسبب وجود احتكاك يؤثّر في العربة؛ سنستخدم حفظ الطاقة من (المعادلة 6 − 15) ، وبتعويض $v_1 = 0$، $y_1 = 40\ m$، $v_2 = 0$، $y_2 = 25\ m$ و $d = 400\ m$ فتصبح:

6. حل: نستطيع حل هذه المعادلة لإيجاد F_{fr}: $F_{fr} = 370\ N$.

لا يمكن التعامل مع النهج المقترح كمجموعةٍ من القوانين الواجب اتباعها خطوةً خطوة. لذلك، فإنّ النهج المقترح، صفحة 157 هو *ملخّص* خطوات تساعد على البدء في حلّ المسائل المتعلّقة بالطاقة.

10-6 القدرة

تعريف القدرة

تمّ تعريف القدرة على أنّها معدل بذل الشغل، أمّا القدرة المتوسّطة فهي الشغل المبذول خلال الفترة الزمنيّة اللازمة لبذله. ويمكن تعريف القدرة أيضًا على أنّها معدّل تحوّل الطاقة. وعليه، فإنّ:

القدرة المتوسطة

$$\overline{P} = \text{القدرة المتوسّطة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}} = \frac{\text{(الطاقة المتحوّلة)}}{\text{الزمن}} \qquad (16-6)$$

وحدة القدرة: الواط

إنّ القدرة الحصانيّة هي الشغل المبذول مقسومًا على الزمن؛ أي الشغل المبذول خلال وحدة الزمن (الثانية). تُصنّف قدرة المحرك بناءً على كميّة الطاقة الكيميائيّة أو الكهربائيّة القابلة للتحوّل إلى طاقةٍ ميكانيكيّةٍ خلال وحدة الزمن. وتقاس وحدة القدرة حسب النظام الدولي بالجول لكل ثانية، وأعطيت هذه الوحدة اسمًا خاصًا، وهو "واط" (W): $1\,W = 1\,J/s$ واعتدنا جميعًا على استعمال الواط (W) من خلال استخدامنا للأجهزة الكهربائية: وهي معدّل تغيير الطاقة الكهربائية لضوء في المصباح الكهربائي أو لطاقةٍ حراريّةٍ في المدفأة؛ كما يستخدم الواط لتحوّلات الطاقة الأخرى أيضًا. أمّا في النظام البريطاني، فإنّ وحدة القدرة هي القدم – باوند لكلّ ثانية (ft.lb/s). وتستخدم أيضًا وحدة عملية كبيرة وهي **القدرة الحصانيّة** *horsepower(hp)*.* التي تمّ تعريفها كمقدار يعادل 550ft.lb/s، وهي مكافئة لـ 746 W.

القدرة الحصانية

تنويه:
ميّز القدرة من الطاقة

انظر إلى المثال التالي لكي تفرّق بين الطاقة والقدرة. يُعدّ الشخص مقيّدًا بمقدار الشغل القادر على بذله، ليس من جهة مقدار الطاقة اللازمة فقط، بل ومن جهة سرعة تحوّل الطاقة أيضًا، وهذا ما يعرف بالقدرة. وعلى سبيل المثال، يمكن لشخص ما أن يسير مسافة طويلة، أو أن يصعد درجًا وطوابق كثيرةً قبل أن يضطر للوقوف نتيجة استهلاكه قدرًا كبيرًا من الطاقة. وفي الوقت نفسه ، إذا حاول الشخص ذاته صعود الدرج راكضًا مسرعًا فإنّه قد يشعر بالتعب سريعًا قبل أن يقطع مسافة طابق أو طابقين إلى أعلى . وعادةً ما يحدث هذا بسبب القدرة؛ أي المعدّل الذي يستطيع عنده جسم الشخص تحويل الطاقة الكيميائيّة إلى طاقة ميكانيكيّة.

المثال 6-14 **القدرة على صعود الدرج** يحتاج عداءٌ كتلته 60-kg إلى زمن قدره 4.0 s لصعود درج طويل (الشكل 6–28). إذا علمت بأن الارتفاع الرأسي للدرجات 4.5 m: (أ) فاحسب قدرة العدّاء الناتجة بدلالة كلٍّ من الواط والحصان (hp). (ب) ما مقدار الطاقة اللازمة لذلك؟

النهج: إنّ الشغل المبذول W من العداء هو ضدُّ الجاذبيّة الأرضيّة، ويعادل $W = mgy$. وللحصول على القدرة الناتجة، نقسم الشغل المبذول W على الزمن المستهلك.

الحل: (أ) متوسّط القدرة الناتجة:

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{mgy}{t} = \frac{(60\,kg)(9.8\,m/s^2)(4.5\,m)}{4.0\,s} = 660\,W$$

بما أنّ هناك 746 W في 1 hp، فإنّ العدّاء يعمل شغلاً بمعدّل يكاد يقلّ عن 1 hp. أي إنّ الإنسان على نحو عام لا يستطيع أن يبذل شغلاً بالمعدّل نفسه ولمدّة طويلة.

(ب) الطاقة اللازمة هي $E = \overline{P}t$ (معادلة 6–16). بما أن $E = \overline{P}t$. إذن $E = (660\,J/s)(4.0\,s) = 2600\,J$ وهذه النتيجة تعادل $W = mgy$.

ملحوظة: يحتاج الشخص في الواقع إلى تحويل مقدارٍ من الطاقة يزيد على 2600 J. ويعود السبب في ذلك إلى أنّ الطاقة الكليّة المتحوّلة بواسطة الشخص أو حتى الآلة، تحتوي دائمًا على أشكال الطاقة جميعها ومن ضمنها الطاقة الحراريّة (تذكّر ارتفاع درجة حرارة جسمك عندما تركض صاعدًا الدرج).



الشكل 6 - 28 (المثال 6 - 14)

* تم اختيار الوحدة من قِبَل جيمس واط (1736 – 1819)، الذي احتاج إلى طريقةٍ ما لوصف القدرة الناتجة من الآلة البخاريّة التي طوّرها والجديدة في حينه. لقد وجد أن الحصان السليم قادرٌ على بذل شغل طوال اليوم بمتوسّط معدّلٍ يقارب 360 ft.lb/s. ولكي لا ينظر إليه على أنّه يبالغ ليزيد من مبيعات آلاته البخاريّة الجديدة، فقد ضرب هذا الرقم بمقدار $1\frac{1}{2}$، عند تعريفه لوحدة القدرة الحصانية hp.

تبذل محرّكات السيّارات شغلًا لكي تتمكّن من صعود التلال والتسارع، والتغلّب أيضًا على قوّة الاحتكاك (بما فيها مقاومة الهواء). وتُعدّ السيّارات مقيدةً بمعدّل قدرة كلٍّ منها على بذل الشغل، مما يحتّم تصنيف محركاتها بدلالة قدرتها بالأحصنة. تحتاج السيارة إلى قدرتها، وبالأخص عندما تتسلّق المرتفعات أو عند تسارعها. وسنقدّم أمثلةً توضيحيّةً على ذلك عند حساب القدرة اللازمة لسيارة ذات حجم متوسط كما في الحالات السابق ذكرها. ويجب أن تكون السيارة قادرةً على بذل شغل كافٍ عندما تتحرّك بسرعةٍ ثابتةٍ على طريقٍ مستوٍ للتغلّب على كلٍّ من قوّتي الاحتكاك الداخلي ومقاومة الهواء؛ لأنّ هذه القوى تعتمد عادةً على سرعة السيارة، وكذلك على الظروف المحيطة لتتراوح قيمتها ما بين $400\ \text{N} - 1000\ \text{N}$.

يُعدّ التعامل مع القدرة بدلالة القوّة المحصّلة المؤثّرة في جسمٍ وسرعته v خيارًا ملائمًا في أغلب الأوقات . ويمكن الوصول إلى هذه الصيغة بسهولة حيث $\overline{P} = W/t$، و $W = Fd$، لتكون d هي المسافة المقطوعة . وعليه:

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{Fd}{t} = F\overline{v} \qquad (17-6)$$

حيث $\overline{v} = d/t$ هي متوسط سرعة الجسم.

المثال 6-15 حاجة السيارة من القدرة

احسب القدرة اللازمة لسيارة كتلتها 1400-kg تخضع للظروف التالية: (أ) تتسلق السيارة تلّةً مائلةً بزاوية 10° درجات إلى الأعلى (تلّة ذات درجة ميل عالية) بسرعة ثابتة مقدارها 80 km/h. (ب) تتسارع السيارة من سرعة 90 km/h إلى سرعة 110 km/h خلال 6.0 s لتتجاوز سيارة أخرى على طريق مستوٍ . افترض أن قوة الممانعة على السيارة هي $F_R = 700\ \text{N}$ طوال الوقت (انظر الشكل 6–29).

النهج: يجب أولًا عدم الخلط بين قوة الممانعة $\vec{F}_R$ على السيارة الناتجة من مقاومة الهواء والاحتكاك الداخلي مع القوة $\vec{F}$ اللازمة لتسريع السيارة إلى الأمام، وهي قوّة الاحتكاك التي يؤثّر بها الطريق في عجلات السيارة كرد فعلٍ لدفع عجلات السيارة للطريق إلى الخلف نتيجة دوران المحرك. لذا، يجب تحديد القوة قبل حساب القدرة.

الحــل: (أ) لكي تتحرك السيارة بسرعة ثابتة وهي تتسلق التلة، يجب أن تؤثّر السيارة بقوة F، بناءً على قانون نيوتن الثاني، مكافئةً لكلٍّ من الممانعة، 700 N، ومركبة الجاذبية الموازية للطريق، $mg \sin 10^\circ$ وعليه:

$$F = 700\ \text{N} + mg \sin 10^\circ$$
$$= 700\ \text{N} + (1400\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(0.174) = 3100\ \text{N}$$

حيث $\overline{v} = 80\ \text{km/h} = 22\ \text{m/s}$، وهي موازية لـ $\vec{F}$، لتصبح (المعادلة 6–17) القـــدرة:

$$\overline{P} = F\overline{v} = (3100\ \text{N})(22\ \text{m/s}) = 6.80 \times 10^4\ \text{W} = 91\ \text{hp}$$

(ب) تتسارع السيارة من 25.0 m/s إلى 30.6 m/s (90 إلى 110 km/h)؛ أي يجب أن تؤثر السيارة بقوة كافية للتغلّب على قوّة الممانعة، 700 N وتعمل على تسارع السيارة:

$$\overline{a}_x = \frac{(30.6\ \text{m/s} - 25.0\ \text{m/s})}{6.0\ \text{s}} = 0.93\ \text{m/s}^2$$

ونطبق قانون نيوتن الثاني للحركة باتجاه المحور السيني:

$$ma_x = \Sigma F_x = F - F_R$$

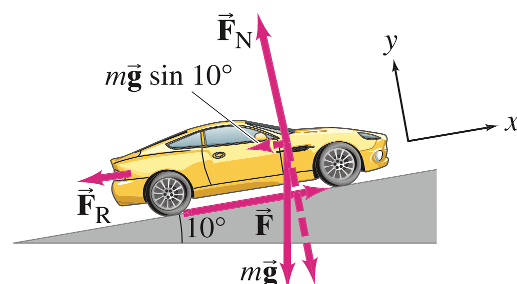
وعليه، فإنّ القوّة اللازمة، F، هي:

$$F = ma_x + F_R$$
$$= (1400\ \text{kg})(0.93\ \text{m/s}^2) + 700\ \text{N}$$
$$= 1300\ \text{N} + 700\ \text{N} = 2000\ \text{N}$$

وبما أنّ $\overline{P} = F\overline{v}$، فإنّ القدرة اللازمة تزداد مع ازدياد السرعة العالية، وعلى المحرّك أن يكون قادرًا على تزويد قدرة عظمى مقدارها:

$$\overline{P} = (2000\ \text{N})(30.6\ \text{m/s}) = 6.12 \times 10^4\ \text{W} = 82\ \text{hp}$$

ملحوظة: عند الأخذ بالحسبان حقيقة أن 60 إلى 80% فقط من قدرة المحرك الناتجة تصل إلى عجلات السيارة، فإنّه من المناسب القول وبناءً على هذه الحسابات إنّ محرّك سيّارة بقدرة 100 إلى 150 hp هو محرك مناسب جدًّا، من وجهة النظر العملية، للقيام بالمهمة السابقة أعلاه.



الشكل 6 – 29 مثال 6-15أ
حساب القوة اللأزمة لسيارة تتسلق هضبة.

لقد ذكرنا في (المثال 6−15) أن جزءًا يسيرًا من الطاقة الناجّة من محرك السيارة يصل إلى دواليبها. وبالإضافة إلى ضياع مقدار لا بأس به من الطاقة خلال انتقالها من المحرك إلى الدواليب، فإن جزءًا كبيرًا لا يستهان به من الطاقة الناجّة من الوقود لا تعمل شغلًا نافعًا ويتمّ هدرها خلال المحرك. لذلك، فإن الصفة المهمة والمميزة لمختلف أنواع الآلات هي كفاءتها الكلية e، التي تم تعريفها كالتالي: النسبة بين القدرة المفيدة الناجّة من الآلة، P_{out} ، إلى القدرة المدخلة، P_{in}:

الكفاية

$$e = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

إنّ مقدار الكفاءة الناجّ هو باستمرار أقل من 1.0، ويعود ذلك إلى عدم قدرة أيّ آلة على استحداث الطاقة من العدم، إضافةً إلى عدم قدرتها على تحويل الطاقة من شكل إلى آخر من غير فقدان جزء من هذه الطاقة على هيئة احتكاك أو حرارة، أو على نحو آخر من الطاقة غير النافعة. وعلى سبيل المثال، فإنّ محرّك السيارة يعمل على تحويل الطاقة الكيميائية الناجّة من احتراق الوقود إلى طاقة ميكانيكيّة تعمل على تحريك مكابس السيارة الأسطوانيّة في البداية؛ لتؤدي إلى تحريك دواليب السيارة في النهاية. ومع هذا، فإن 85% من الطاقة المدخلة يتم فقدانه كطاقةٍ حراريّة تمرّ من خلال نظام التبريد وأنبوب العادم، إضافة إلى فقدان ما تبقى منها نتيجة احتكاك الأجزاء المتحركة ببعضها بعضًا. وعليه، فإن كفاءة محركات السيارات تكاد تصل إلى 15%. وسوف ندرس ونناقش هذا الموضوع بالتفصيل في الفصل الخامس عشر.

ملخّص

يُبذلُ **الشغل** على جسمٍ بواسطة قوّةٍ ما خلال تحرك الجسم مسافة d. وإذا صنعت القوة الثابتة F زاوية مقدارها θ مع اتجاه الحركة، فإنّ الشغل المبذول بواسطة هذه القوة يعطى كالتالي:

$$W = Fd\cos\theta \qquad (1-6)$$

يمكن تعريف **الطاقة** على أنها إمكانية عمل شغلٍ ما. ويتمّ قياس الشغل والطاقة حسب النظام الدولي للوحدات (SI) باستخدام وحدة الجول: $(1\,J = 1\,N\cdot m)$.

وتمّ **تعريف الطاقة الحركيّة** (KE) على أنها الطاقة الناجّة من حركة الأجسام. ويمتلك جسم كتلته m وسرعته v طاقة حركية انتقالية مقدارها:

$$KE = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad (3-6)$$

تُعرّفُ **طاقة الوضع** (PE) على أنها الطاقة المرتبطة بالموضع. وتُعطى طاقة الوضع الناجّة من قوة جذب الأرض للأجسام كالتالي:

$$PE_{grav} = mgy \qquad (6-6)$$

ويمثل y ارتفاع جسمٍ ما كتلته m مقارنةً بنقطة مرجعيّة عشوائيّة يتمّ اختيارها. وتُعطى طاقة الوضع المرنة لزنبرك متمدّد أو مضغوط بالعلاقة التالية :

$$PE_{\text{المرن}} = \tfrac{1}{2}kx^2 \qquad (9-6)$$

حيث تمثّل x إزاحة الزنبرك عن موضع الاتزان، في حين تمثّل k ثابت صلابته . وهناك طاقات وضع، أو طاقات كامنة أخرى من ضمنها الطاقة الكيميائية، والكهربائيّة، والنوويّة. إنّ التغيّر في طاقة الوضع الناجّ من تغير موضع الجسم يعادل قيمة الشغل الخارجي اللازم لنقل الجسم من موضع إلى آخر.

بناءً على **مبدأ الشغل والطاقة** فإنّ محصّلة **الشغل المبذول على جسمٍ ما** (بواسطة القوّة المحصّلة) تعادل التغيّر في طاقة الجسم الحركية، ويُعطى حسب المعادلة التالية:

$$W_{net} = \Delta KE = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 \qquad (4-6 \text{ ، } 2-6)$$

بناءً على **قانون حفظ الطاقة**، يمكن أن تتحوّل الطاقة من شكلٍ إلى آخر شريطة أن يبقى مقدارها الكلّي ثابتًا لا يتغيّر. ويبقى هذا القانون صحيحًا بوجود الاحتكاك لاعتبار الاحتكاك أو الطاقة الحرارية شكلًا من أشكال تحوّل الطاقة.

وعندما تكون القوى الفاعلة محافظةً تصبح الطاقة الميكانيكيّة الكليّة محفوظة:

$$KE + PE = \text{مقدار ثابت}$$

أمّا عندما تكون القوى الفاعلة غير محافظةٍ كقوّة الاحتكاك، فتصبح المعادلة كالتـــــالي:

$$W_{NC} = \Delta KE + \Delta PE \qquad (10-6)$$

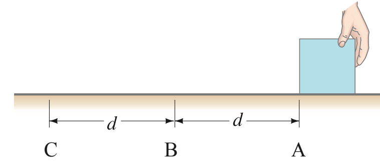
بحيث تمثّل الشغل المبذول بواسطة القوى غير المحافظة.

وتمّ تعريف **القدرة** (*Power*) على أنّها معدّل عمل الشغل، أو معدّل تغيّر الطاقة من شكلٍ إلى آخر. وعليه، فإنّ الوحدة الدوليّة للقدرة حسب نظام الوحدات الدولي (SI) هي **"واط"** *Watt* حيث $(1\,W = 1\,J/s)$.

أسئلة

1. ما أوجه الشبه والاختلاف في تعريف "الشغل" كمصطلحٍ فيزيائيٍّ مقارنةً مع لغة الناس عامة؟ دعّم إجابتك بالأمثلة المناسبة لكلا الحالتين.
2. هل يمكن للقوّة المركزيّة أن تعمل أيّ شغلٍ على الجسم؟ وضّح إجابتك.
3. هل يمكن للقوّة العموديّة أن تعمل أيّ شغلٍ على الجسم؟ وضّح إجابتك.
4. هل يعمل السبّاح أي شغلٍ عندما يحاول السباحة بعكس التيّار مما ينجم عن بقائه في موضعه نسبةً إلى الشاطئ؟
5. هل يمكن القول بأنّ شغل قوى الاحتكاك هو مقدار سالب دائما؟ (تنويه: انظر ما يحدث للأطباق على الطاولة عندما يتم سحب غطاء الطاولة من تحتها).
6. لم يُعدّ دفع حائط مبنى صلبٍ ساكنٍ أمرًا صعبًا مع أنّك لم تبذل شغلا؟
7. إذا كان لديك زنبركان متماثلان مع فرق واحد وهو أن الزنبرك الأول أكثر صلابةً من الثاني $(k_1 > k_2)$، فعلى أي منهما يكون الشغل المبذول أكبر: أ) إذا تمت استطالتهما تحت تأثير القوة نفسها؟ أم ب) إذا تمت استطالتهما للمسافة نفسها؟

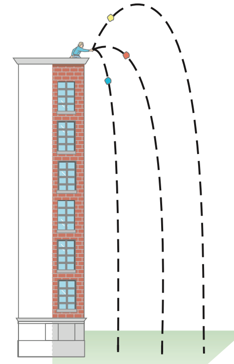
8. تؤثّر يدٌ بقوّةٍ أفقيّةٍ ثابتةٍ في مكعبٍ قادرٍ على الانزلاق على سطحٍ أملس (الشكل 6 − 30). إذا بدأ المكعب بالحركة من السكون من النقطة A ليقطع مسافة d ويصل إلى النقطة B ستصبح سرعته v_B. فما سرعة المكعب عندما يقطع مسافة إضافية مقدارها d ليصل بعدها إلى النقطة C، هل هي أقلّ من $2v_B$؟ وضّح الأسباب وراء إجابتك.



الشكل **6-30**
(السؤال 8).

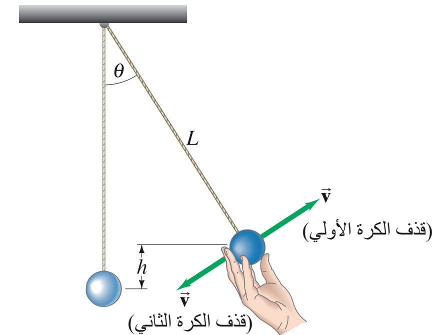
9. ما مقدار التغيّر التقريبي في طاقة جذب الأرض لك عندما تقفز إلى أعلى ارتفاع ممكن ناجٍ من قوة دفع أقدامك؟

10. في (الشكل 6−31)، وعند إهمال مقاومة الهواء، أي بالون مليء بالماء يصطدم بسرعة أعلى بالأرض عندما يتمّ قذفه من أعلى البناية؟ (علمًا بأنّ السرعة الابتدائية للبالونات جميعها واحدة، ولكن لكلّ بالون زاوية قذفٍ مختلفة).



الشكل **6-31**
(السؤال 10).

11. تمّ إطلاق بندول بسيط بطريقتين مختلفتين من الارتفاع h نفسه، مقارنةً بأخفض نقطةٍ يمكن أن يصل إليها (الشكل 6−36). تم إعطاء البندول سرعةً ابتدائيّةً مقدارها 3.0 m/s خلال الإطلاقين، بحيث يكون أولهما إلى الأعلى والثاني إلى الأسفل على امتداد المسارين. أيّ من الإطلاقين سيسبّب أكبر زاوية تذبذب للبندول مقارنةً مع وضع الاتزان؟ وضح إجابتك.



الشكل **6 - 32** (السؤال 11).

12. إذا تمّ التأثير في ملفٍّ زنبركيٍّ ساكنٍ على سطح طاولة (ذي كتلة m) بالضغط عليه باليد إلى أسفل، ثم أُزيحت اليد جانبًا، فهل يستطيع الزنبرك القفز عن الطاولة؟ وضّح إجابتك مستعينًا بقانون حفظ الطاقة.

13. إذا أراد مدرّسٌ أن يتفادى الإصابة الناجّة من كرة البولينج المعلّقة في السقف بواسطة سلكٍ معدنيٍّ عند ارتدادها باتجاهه، فعليه أن يمسك الكرة بدايةً من أمام أنفه، وظهره مستندًا إلى الحائط، ثم يترك الكرة لتبدأ بالحركة من وضع السكون، كما في (الشكل 6 − 33). لماذا يجب على المدرس أن يفعل ذلك من غير دفع الكرة؟



الشكل **6 - 33**
(السؤال 13).

14. ماذا يحدث لطاقة الوضع الناجّة من جذب الأرض عندما تسقط المياه من أعلى الشلال باتجاه بركة مياه في الأسفل؟

15. صف التغيّر في أشكال الطاقة عندما يقفز طفل على العصاة الزنبركية (عصاة البوجو).

16. صف التغيّر في أشكال الطاقة الناجّ من التزلج على الجليد من أعلى منحدر، بدءًا من السكون إلى لحظة الاصطدام بالثلج المتراكم أسفل المنحدر ووقوف المتزلج المفاجيء والتام.

17. يبدأ طفل بالانزلاق من السكون على مزلاجته إلى أسفل منحدر ارتفاعه h (الكتلة الكلية m)، فهل ستعتمد سرعة المزلاجة أسفل المنحدر على درجة ميلانه: (أ) عندما يكون سطح المنحدر مغطّى بطبقة صقيع (لا يوجد احتكاك). (ب) عندما يكون سطح المنحدر مغطّى بطبقةٍ من الثلج الكثيف المسبب للاحتكاك.

18. لماذا يفضل الرحالة الموسميون القفز عن الأغصان المتساقطة إلى جانبها الآخر للمرور بدلاً من الوقوف عليها؟ وضّح إجابتك.

19. إذا تمّ إطلاق قوسين سرعة أحدهما ضعف سرعة الآخر على رزمةٍ من محصولٍ زراعي، فما الفرق في مسافة اختراق السهم السريع للرزمة مقارنة مع المسافة التي سيخترقها السهم البطيء، إذا افترضنا أنّ الرزمة تؤثّر بقوّة احتكاكٍ ثابتةٍ على كلا القوسين؟ وضّح إجابتك.

20. حلّل بدلالة الطاقة حركة بندول بسيط يهتز عند: (أ) إهمال الاحتكاك. (ب) أخذ الاحتكاك بالحسبان. وضح لماذا يجب أن تتم تعبئة الساعة البندوليّة.

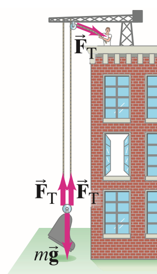
21. هل يمكن لكرةٍ مثاليّةٍ تسقط باتجاه الأرض أن ترتدّ لتصل إلى مستوى أعلى من ارتفاعها الأصلي؟ وضّح إجابتك.

22. يعتمد الشغل المبذول على حقيبةٍ عند رفعها من الأرض إلى طاولة على: (أ) ما إذا تم رفعها مباشرة إلى أعلى أو من خلال طريق متشعب. (ب) الوقت المستغرق في رفعها. (ج) ارتفاع الطاولة. (د) وزن الحقيبة.

23. أعد حل المسألة السابقة بالنسبة إلى القدرة بدلًا من الشغل المبذول على الحقيبة.

24. لماذا تُعدّ عملية صعود الجبل باستخدام طريقٍ متعرّجٍ دائمًا أسهل مقارنةً مع الصعود المباشر إلى الأعلى؟

25. تذكر من الفصل الرابع، (المثال 4–14)، بأنك تستطيع أن تستخدم بكرةً وحبلاً للتقليل من قيمة القوة اللازمة لرفع حمل ثقيل إلى أعلى (انظر الشكل 6–34). ما طول الحبل الواجب سحبه ليتم رفع الثقل مسافة 1 m إلى أعلى؟ استخدم مبدأ الطاقة.



الشكل **6 - 34**
(السؤال 25).

مسائل

6 – 1 الشغل، القوة الثابتة

.1 (I) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة قوة جذب الأرض عندما تسقط رافعة كتلتها 265-kg مسافة 2.80 m؟

.2 (I) ما مقدار الشغل الذي يبذله رجل الدفاع المدني (كتلته 65.0-kg) عندما يصعد درجًا إلى أعلى مسافة 20.0 m؟

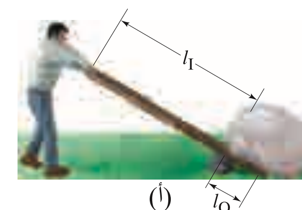
.3 (I) ما مقدار الشغل اللازم بذله لتحريك صندوق شحن وزنه 1300-N بسرعة ثابتة: (أ) مسافة 4.0 m عن سطح الأرض ضدَّ قوّة احتكاك مقدارها 230 N؟ (ب) مسافة 4.0 m عموديًّا؟

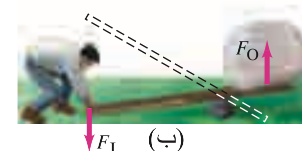
.4 (I) ما مقدار الشغل الذي يجب أن يقوم به العمّال عند دفعهم صندوق شحنٍ كتلته 160-kg مسافةً أفقيّةً مقدارها 10.3 m على سطح أرضٍ خشنٍ من غير تسارع إذا كان معامل الاحتكاك الفاعل يعادل 0.50؟

.5 (II) أوجد محصّلة الشغل المبذول على صندوقٍ كتلته 5.0 kg عند تسارعه من السكون على سطح الأرض بمعدل $2.0\ m/s^2$ لمدة 7.0 s.

.6 (II) ما مقدار الشغل اللازم بذله لوضع ثمانية كتبٍ فوق بعضها بعضًا على سطح طاولة، إذا كان سمك كلِّ كتابٍ هو 4.3 cm وكتلته 1.7 kg؟

.7 (II) يمكن استخدام العتلة الرافعة لرفع أثقال من غير الممكن رفعها بأيّ طريقةٍ أخرى، كما في (الشكل 6 – 35). أثبت أنّ العلاقة بين القوّة الناتجة F_O إلى القوّة المدخلة F_I ونسبة الأطوال l_I و l_O كالتالي: مقارنةً بنقطة الارتكاز. $F_O/F_I = l_I/l_O$ أهمل كلًّا من قوة الاحتكاك وكتلة العتلة الرافعة، وافترض أن الشغل الناتج يعادل الشغل المدخل.





الشكل 6 – 35 (المسألة 7).
عتلة رافعة بدائية

.8 (II) تنزلق آلة بيانو كتلتها 330-kg مسافة 3.6 m بلا تسارع إلى أسفل سطح يميل بمقدار 28° نتيجة دفعها بقوّةٍ موازيةٍ للسطح المائل، كما في (الشكل 6 – 36). إذا كان معامل الاحتكاك الحركي يعادل 0.40، فاحسب كلًّا من: (أ) القوة التي تتأثر بها الآلة. (ب) الشغل المبذول على الآلة. (جـ) الشغل المبذول بواسطة قوّة الاحتكاك. (د) الشغل المبذول بواسطة قوّة الجاذبية الأرضيّة. (هـ) محصّلة الشغل المبذول على آلة البيانو.



الشكل 6 - 36 (المسألة 8) .

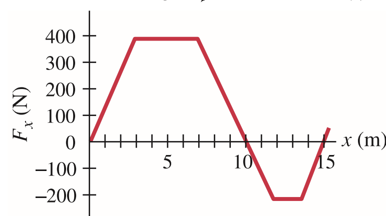
.9 (II) (أ) أوجد القوّة اللازمة لتزويد طائرةٍ عمودية كتلتها M بتسارع مقداره $0.10\,g$ إلى الأعلى. (ب) أوجد الشغل المبذول بواسطة هذه القوة عند ارتفاع الطائرة العمودية مسافة h إلى الأعلى.

.10 (II) ما أقل قدر من الشغل اللازم لدفع سيارة كتلتها 950-kg مسافة 810 m إلى أعلى على سطح مائل بزاوية 9.0° فوق الأفقي: (أ) عند إهمال الاحتكاك؟ (ب) عند فرض معامل الاحتكاك الفاعل للسيارة 0.25؟

*6 – 2 الشغل والقوة المتغيرة

*.11 (II) افترض أن محور المسافة خطّي، و $d_A = 10.0\ m$ و $d_B = 35.0\ m$، كما في (الشكل 6–16 أ) . قدّر الشغل المبذول بواسطة القوّة F عند تحريك جسم كتلته 2.80-kg من d_A إلى d_B.

*.12 (II) تتغيّر القوّة المؤثّرة في جسمٍ ما باتجاه المحور السيني، كما يظهر في (الشكل 6–37) حدّد الشغل المبذول بواسطة هذه القوة عند تحريك الجسم: (أ) من $x = 0.0$ إلى $x = 10.0\ m$. (ب) من $x = 0.0$ إلى $x = 15.0\ m$.



الشكل 6–37 (المسألة 12) .

*.13 (II) استخدم الرسم البياني لتحدد الشغل اللازم بذله عند استطالة زنبرك ثابت صلابته $k = 88\ N/m$ من $x = 3.8\ cm$ إلى $x = 5.8\ cm$، بحيث تمثل x إزاحة الزنبرك عن وضع الاتزان.

.14 (II) تؤثّر القوّة المحصّلة في جسم باتجاه المحور السيني الموجب. ويزداد مقدارها خطيًّا من صفر عند $x = 0$ إلى 24.0 N عند $x = 3.0\ m$. وتبقى قيمتها ثابتة عن القيمة 24.0 N من النقطة $x = 3.0\ m$ إلى النقطة $x = 8.0\ m$ ثم تبدأ بالنقصان خطيًّا حتى تصل قيمتها إلى صفر عند $x = 13.0\ m$. احسب الشغل اللازم لنقل الجسم من $x = 0$ إلى $x = 13.0\ m$ باستخدام الرسم البياني وحساب المساحة الواقعة تحت منحنى F_x مقابل المحور السيني.

6 – 3 الطاقة الحركية؛ مبدأ الشغل والطاقة

.15 (I) ما سرعة جزيء الأكسجين عند درجة حرارة الغرفة إذا كانت كتلته تعادل $5.31 \times 10^{-26}\ kg$ وتقدّر طاقته الحركية بـ $6.21 \times 10^{-21}\ J$ تقريبًا؟

.16 (I) (أ) ما معامل ازدياد سرعة القوس عند مضاعفة طاقته الحركيّة؟ (ب) ما معامل ازدياد طاقته الحركية عند مضاعفة سرعتها؟

.17 (I) ما مقدار الشغل اللازم لإيقاف إلكترون $(m = 9.11 \times 10^{-31}\ kg)$ يتحرّك بسرعةٍ مقدارها $1.90 \times 10^6\ m/s$؟

.18 (II) احسب الشغل الضروري بذله لإيقاف سيارةٍ تسير بمعدل 105 km/h إذا كانت كتلتها 1250-kg؟

.19 (II) كتلة سهمٍ 88-g أُطلق من قوسٍ يؤثّر عليه بقوّة متوسّطة مقدارها 110 N خلال مسافة 78 cm. ما سرعة السهم عند انطلاقه من القوس تحت تأثير تلك القوّة؟

.20 (II) ما متوسط تأثير قوّة كرة بيسبول كتلتها $(m = 140\ g)$ تسير بسرعة 32 m/s خلال دفعها ليد اللاعب إلى الخلف مسافة 25 cm في أثناء إمساكه بالكرة؟

.21 (II) حدّد معامل ازدياد المسافة اللازمة للتوقّف عند زيادة سرعة السيارة بمقدار 50%؟ اهمل زمن ردّ فعل السائق مفترضًا أنّ المؤثرات الأخرى جميعها ثابتة.

.22 (II) قاس محققون آثار العجلات المنزلقة في موقع حادث فوجدوها تصل إلى 88 m. تم تقدير معامل الاحتكاك الحركي على السطح المبلل بمياه الأمطار ليكون 0.42. استخدم هذه المعلومات لتحديد سرعة السيارة لحظة تطبيق السائق (وإغلاق) كوابح السيارة. علّق لِمَ لا تدخل كتلة السيارة في حساب سرعتها.

.23 (II) خسرت كرة بيسبول (كتلتها 0.25 kg) 10% من سرعتها الأصلية 95 km/h منذ لحظة إرسالها إلى وقت وصولها إلى القاعدة. احسب متوسط قوة مقاومة الهواء خلال إرسالها إذا كانت المسافة الفاصلة بين المرسل والقاعدة النهائية هي 15 m. (اهمل قوة جذب الأرض للكرة).

.24 (II) إلى أيّ ارتفاع ستصل كرة كتلتها 1.85-kg إذا قذفتها فتاة مباشرة إلى أعلى عند بذلها 80.0 J على الكرة؟ (اهمل مقاومة الهواء).

.25 (III) إذا تم رفع ثقلٍ كتلته 285-kg مسافة 22.0 m إلى أعلى باستخدام حبل رفع سميك بتسارع قدره $a = 0.160\, g$، فاحسب: (أ) قوّة الشد في الحبل. (ب) محصّلة الشغل المبذول على الثقل. (جـ) الشغل الذي بذله الحبل على الثقل. (د) السرعة النهائية للثقل على افتراض أنّه بدأ الحركة من السكون.

6 – 4 و 6 – 5 طاقة الوضع

.26 (I) ما مقدار الاستطالة اللازمة لزنبرك (ثابت صلابته: $k = 440$ N/m) لكي يخزن طاقة مقدارها 25 J؟

.27 (I) ما مقدار التغيّر في طاقة الوضع لقرد كتلته 7.0 kg، عندما ينتقل من فرع شجرة إلى آخر يرتفع بمقدار 1.2 m؟

.28 (I) ما مقدار التغيّر في طاقة وضع لاعب قفزٍ عالٍ كتلته 64-Kg، عندما يرتفع مركز كتلته 4.0 m تقريبًا خلال القفز؟

.29 (II) تتحرك سيارة كتلتها 1200-kg على سطحٍ أفقيٍّ بسرعةٍ مقدارها $v = 65$ km/h وتصطدم بزنبرك لتضغطه مسافة 2.2 m قبل أن تصل إلى السكون.ما معامل الصلابة للزنبرك؟

.30 (II) يرفع طالبٌ طوله 1.60 m كتابًا كتلته 2.10-kg عن سطح الأرض إلى ارتفاع 2.20 m. ما طاقة الوضع للكتاب نسبة إلى: (أ) سطح الأرض؟ (ب) أعلى رأس الطالب؟ (جـ) ما علاقة الشغل المبذول بواسطة الطالب بالإجابة عن الفرعين السابقين؟

.31 (II) يبدأ رياضيٌّ كتلته 55-kg بالتسلّق من ارتفاع 1600 m ليصل إلى قمّة ترتفع بمقدار 3300-m. (أ) ما التغيّر في طاقة وضع الرياضي؟ (ب) ما مقدار أدنى شغلٍ يجب على الرياضي بذله؟ (جـ) هل يمكن للشغل المبذول الفعلي أن يكون أكثر من ذلك؟ فسر لماذا.

.32 (II) عندما تمّ تعليق زنبرك ($k = 53$ N/m) عموديًّا بجوار مسطرة، كانت القراءة على المسطرة قرب نهاية الزنبرك هي 15-cm. ما القراءة الجديدة على المسطرة بقرب نهاية الزنبرك عندما يتمّ تعليق كتلةٍ مقدارها 2.5-kg به؟ (ملحوظة: تُؤخذ القراءة فقط لحظة اتزان النظام المكوّن من الزنبرك والكتلة المعلقة به).

6 – 6 و 6 – 7 حفظ الطاقة الميكانيكيّة

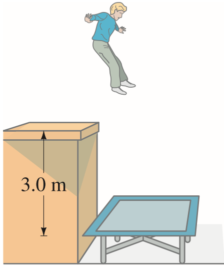
.33 (I) أمسكت جميلة وهي تركض خلف طرزان بسرعةٍ عالية (مقدارها 5.3 m/s) بجذعٍ يتدلّى عموديًّا من شجرةٍ في الغابة. ما أعلى ارتفاع تستطيع أن تصل إليه؟ وهل يؤثر طول الجذع في الإجابة؟

.34 (I) تبدأ متزلجةٌ هاويةٌ بالانزلاق من السكون إلى الأسفل على سطح أملس ارتفاعه 185 m ويميل بزاوية 35.0°. ما السرعة النهائية للمتزلجة عند أسفل المنحدر؟

.35 (I) ما السرعة الابتدائيّة لمزلاج تمّ دفعه إلى أعلى منحدرٍ أملسٍ يميل بزاوية 28.0° لحظة وصوله إلى ارتفاع مقداره 1.35 m مقارنةً مع موضعه الابتدائي؟

.36 (II) تُحوِّل فاطمة طاقتها الحركيّة إلى طاقة وضع خلال الوثب العالي دون الحاجة إلى استخدام عمود الوثب. ما أدنى سرعةٍ يجب أن تصل إليها فاطمة لكي تستطيع أن ترفع مركز كتلتها بمقدار 2.10 m لتتمكن من القفز فوق العارضة بسرعة مقدارها 0.70 m/s؟

.37 (II) يقفز لاعب كتلته 65-kg إلى الأعلى من منصّة قفزٍ بسرعةٍ مقدارها 5.0 m/s. (أ) ما سرعة اللاعب لحظة وصوله إلى النطاط الموجود على ارتفاع 3.0 m أسفل المنصة (الشكل 6–38)؟ (ب) ما مقدار انضغاط النطاط إلى أسفل عند اعتباره زنبركًا ذا ثابت صلابة يساوي 6.2×10^4 N/m؟

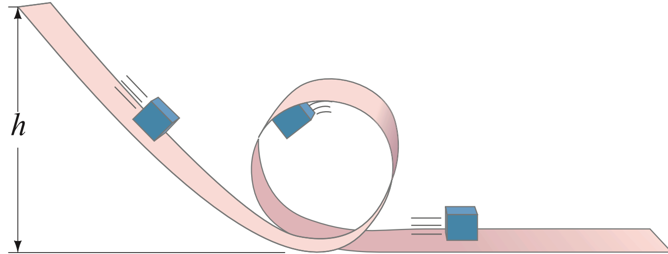


الشكل 6 – 38
(المسألة 37).

.38 (II) أطلق مقذوف من قمّة جرفٍ بسرعة 185 m/s إلى الأعلى بزاوية 45.0°. ما سرعة المقذوف لحظة اصطدامه بالأرض إذا كان ارتفاع الجرف 265-m؟ (استخدم مبدأ حفظ الطاقة).

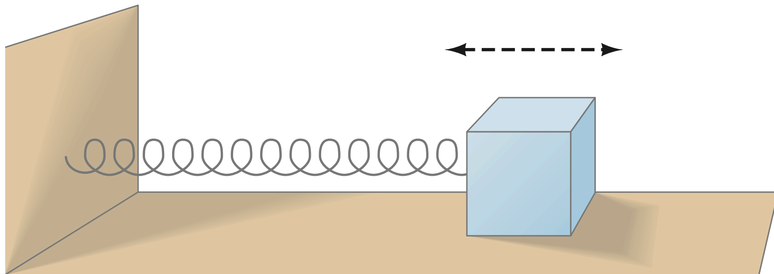
.39 (II) تمّ ضغط زنبركٍ عموديٍّ (مهمل الكتلة) على سطح طاولة مسافة 0.150 m. إذا كان ثابت صلابة الزنبرك 950 N/m، فاحسب: (أ) السرعة العموديّة المعطاة لكرة كتلتها 0.30-kg عند إفلات الزنبرك؟ (ب) أقصى ارتفاع يمكن أن تصل إليه الكرة مقارنةً مع موقعها الأصلي عندما يكون الزنبرك مضغوطًا؟

.40 (II) ينزلق مكعب كتلته m على طول مسارٍ حلقيٍّ أملس لا يحدث أي احتكاك كما في (الشكل 6 – 39) . ما أدنى ارتفاع h يجب أن يبدأ المكعب عنده بالانزلاق بحيث يبقى المكعب ملاصقاً للمسار، حتى عند أعلى نقطة في الحلقة الدائرية (نصف قطر الدائرة = r).



الشكل 6 – 39 (المسألة 40 و 75) .

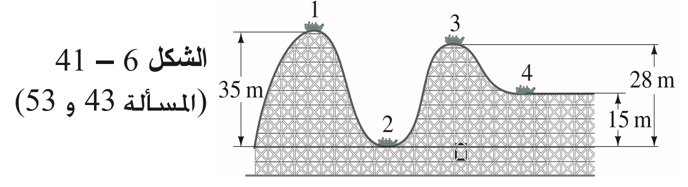
.41 (II) تم ربط مكعب كتلته m بنهاية زنبرك (ثابت صلابة الزنبرك k) كما في (الشكل 6 – 40). اكتب معادلة الطاقة الميكانيكيّة الكليّة (مهملا الاحتكاك وكتلة الزنبرك) بدلالة كلٍّ من x_0 والموضع x، والسرعة v عندما يبدأ المكعب بالتذبذب إلى الأمام والخلف نتيجة إزاحته مسافة ابتدائية مقدارها x_0.



الشكل 6 – 40 (المسألة 41، 55 و 56) .

.42 (II) تقفز لاعبة كتلتها 62-kg من أعلى جسر. فإذا هوت مسافة 31 m إلى الأسفل وهي ممسكة بحبل مرن (طوله في حالة الاسترخاء 12 m) فاحسب: (أ) ثابت معامل صلابة الحبل المرن k الخاضع لقانون هوك. (ب) احسب أقصى تسارع تشعر به اللاعبة.

43. (II) تمّ سحب عربة أفعوانية كما في (الشكل 6 – 41) إلى الموضع 1، ومن ثمّ تُركت لتهوي من السكون. احسب السرعة عند كل من المواضع 2، 3، 4 (أهمل الاحتكاك).



الشكل 6 – 41
(المسألة 43 و 53)

44. (II) رُميت كرةٌ كتلتها 0.40-kg بسرعة مقدارها 12 m/s بزاوية 33° (أ) ما سرعة الكرة عند أعلى نقطة. (ب) ما أعلى ارتفاع تصل إليه الكرة؟ (استخدم مبدأ حفظ الطاقة، واهمل مقاومة الهواء).

45. (III) صمم مهندس زنبركًا ليتم وضعه أسفل عمود التحكم بالمصعد. احسب قيمة ثابت صلابة الزنبرك k الذي يضمن ألا يزداد تسارع الركاب على 5.0 g أضعاف عجلة الجاذبية الأرضية عندما يُجلب المصعد للسكون عند انقطاع حبل تثبيت المصعد.

46. (III) ينوي درّاج أن يتسلق تلّةً درجة ميلها 7.8° وارتفاعها الرأسي 150 m. إذا كانت كتلتا الدّراج والدّراجة معًا 75 kg، فاحسب: (أ) مقدار الشغل اللازم بذله ضدّ عجلة الجاذبية الأرضية. (ب) متوسط القوة التي يجب أن تطبق على بدالات الدراجة إذا كانت كل دورة كاملة للبدالات تنقل الدّراجة مسافة 5.1 m. (اهمل شغل الاحتكاك وأي شغل ضائع آخر، علمًا بأنّ قطر دائرة البدالات هي 36 cm).

6 – 8 و 6 – 9 قانون حفظ الطاقة

47. (I) تتصادم مقطورتان على سكة حديد (كتلة كل منهما 7650 kg وتسيران بسرعة 95 km/h باتجاهين متعاكسين) تصادمًا رأسيًّا لتقفا بعدها وقوفًا تامًّا. ما مقدار الطاقة الحرارية المولدة الناجّة من هذا التصادم؟

48. (II) يبدأ طفل كتلته 21.7-kg بالانزلاق على سطح مائل من ارتفاع 3.5 m ليصل إلى سرعة مقدارها 2.2 m/s عند أسفل المنحدر. ما الطاقة الحرارية المولدة خلال الاحتكاك نتيجة عملية الانزلاق هذه؟

49. (II) يبدأ متزلّج بالانزلاق من السكون مسافة 75 m على سطح مائل بزاوية 22°. (أ) ما سرعة المتزلّج عند أسفل المنحدر إذا كان معامل الاحتكاك 0.090؟ (ب) ما المسافة التي سيقطعها المتزلج قبل أن يقف وقوفًا كاملا بعد أن يصل إلى أسفل المنحدر إذا كان معامل احتكاكٍ الثلج المستوي على سطح الأرض الأفقي هو الرقم السابق نفسه؟ استخدم طرق الطاقة.

50. (II) أُسقطت كرة بيسبول كتلتها 145-g من شجرة ترتفع 13.0 m فوق سطح الأرض. (أ) ما سرعة اصطدامها بالأرض لحظة إهمال مقاومة الهواء؟ (ب) ما متوسط قوة مقاومة الهواء للكرة لحظة اصطدامها بالأرض بسرعة فعلية 8.00 m/s؟

51. (II) عندما تسقط الكرة من ارتفاع 2.0 m لترتد مرتفعة مسافة 1.5 m، حدّد: (أ) نسبة الطاقة الضائعة نتيجة الارتداد. (ب) سرعة الكرة لحظة ارتدادها من سطح الأرض. (جـ) أوجه ضياع الطاقة.

52. (II) تمّ دفع عربة كتلتها 110-kg على سطح أفقي بواسطة قوة أفقية ثابتة مقدارها 350 N. ما السرعة النهائية للعربة إذا كان السطح أملس خلال أول 15 m، ثم أصبح خشنًا بمعامل احتكاك مقداره 0.30 لمسافة 15 m؟

53. (II) افترض أن سرعة عربة أفعوانية لحظة مرورها بالموضع 1 تصل إلى 1.70 m/s كما في (الشكل 6–41) . ما سرعتها عندما تصل الموضع 2 إذا كان متوسّط طاقة الاحتكاك يعادل خمس وزنها. علمًا بأنّ المسافة المقطوعة هي 45.0 m؟

54. (II) يصل متزلّج يسير بسرعة 12.0 m/s إلى أسفل منحدر يميل بزاوية 18.0° ليبدأ بعدها بصعود سطح مائل وفقدان سرعته ليصل إلى السكون بعد أن يقطع مسافة 12.2 m. ما متوسط معامل الاحتكاك؟

55. (III) يربط مكعب خشبي كتلته 0.620 kg بإحكام بزنبرك أفقي ضعيف جداً (k = 180 N/m) كما في (الشكل 6 – 40) . يخضع نظام المكعب والزنبرك للاستطالة إلى الخارج مسافة 2.3 cm مبتعدًا عن وضع الاتزان قبل أن يتوقف ويرتد في الاتجاه الآخر كنتيجة لضغطه مسافة 5.0 cm. ما معامل الاحتكاك الحركي بين سطحي المكعب والطاولة؟

56. (III) يربط مكعب خشبي كتلته 280-g بإحكام بزنبركٍ أفقي ضعيف جداً،(الشكل 6–40) يستطيع المكعب الانزلاق على سطح طاولة ليكون معامل الاحتكاك 0.30. ما مقدار استطالة الزنبرك القصوى مقارنة مع وضع الاتزان عند تحرّره وبعد انضغاطه مسافة 18 cm بواسطة قوة مقدارها 22N؟

57. (III) أُطلقت مركبة فضاء خلال تجاربها الأولى للطيران أفقيًّا بسرعة 500 km/h من ارتفاع 3500 m بواسطة زلّاجة (كتلتها وكتلة الطيار معًا 980 kg) لتهبط الزلّاجة بعدها بسرعة مقدارها 200 km/h. (أ) ما سرعة الهبوط في حالة انعدام احتكاك الهواء؟ (ب) ما متوسط قوّة مقاومة الهواء المؤثّرة فيه إذا عاد إلى الأرض بسرعةٍ ثابتةٍ بزاوية 10°؟

6 – 10 القدرة

58. (I) ما مقدار الزمن اللازم لمحرّك قدرته 1750-W لرفع آلة بيانو كتلتها 315 kg إلى شباك في الطابق السادس على ارتفاع 16.0 m. إلى الأعلى؟

59. (I) ما متوسط القوة المؤثرة في سيارة نتيجة الاحتكاك ومقاومة الهواء، إذا كانت السيارة تولد قدرة مقدارها 18 hp عندما تسير بسرعة ثابتة مقدارها 88 km/h؟

60. (I) ما متوسط قدرة محرك سيارة كتلتها 1400-kg تتسارع من السكون إلى 95 km/h خلال 7.4 s؟

61. (I) أثبت أن القدرة الحصانيّة الواحدة (550 ft.lb/s) تعادل 746 W. (ب) ما القدرة الحصانيّة لمصباح ضوئي قدرته 75-W؟

62. (II) يعبر عادةً عن وحدات الطاقة الكهربائية بدلالة "كيلو واط. ساعة". (أ) اثبت أنّ واحد كيلو واط-ساعة (kWh) يُعادل 3.6×10^6J. (ب) ما كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة بدلالة kWh التي ستظهر على فاتورة الكهرباء لعائلة مكونة من أربعة أشخاص، (جـ) كم من الجولات تعادل هذه الكمية؟ إذا كان متوسط معدل استهلاكهم للطاقة الكهربائية هو 520 W. (د) ما قيمة هذا الاستهلاك بالدولار إذا كانت قيمة $kWh = \$0.12$؟ هل تعتمد قيمة فاتورتهم الشهرية على متوسط معدل استهلاكهم من الطاقة الكهربائيّة.

63. (II) لاحظت سائقة أن سيارتها (ذات 1150-kg) تتباطأ على السطح الأفقي من سرعة 85 km/h إلى سرعة 65 km/h خلال 6.0 s عند تثبيت عمود السرعات في الوضعية المحايدة. ما القدرة (بدلالة كل من الواط والقدرة الحصانية) اللازمة للمحافظة على سرعة السيارة ثابتة عند 75 km/h؟

64. (II) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة محرك قدرته 3.0-hp خلال ساعة واحدة؟

65. (II) ما متوسط القدرة اللازمة لتسريع كرة ثقيلة كتلتها 7.3-kg عند قذفها من السكون لتصل إلى سرعة مقدارها 14 m/s خلال 1.5 s؟

66. (II) ترفع مضخّة ماءً كتلته 18.0 kg مسافة 3.60 m خلال دقيقة واحدة. ما مقدار قدرة محرك المضخة (بالواط)؟

67. (II) ركض لاعبو فريق جامعة لكرة القدم خلال التدريب إلى أعلى مدرج الملعب خلال 66 s. إذا كان طول المدرج المائل بـ 32° هو 140 m، ومتوسط كتلة اللاعب 95 kg، فاحسب متوسط قدرة اللاعب خلال صعوده إلى أعلى المدرج. اهمل الاحتكاك ومقاومة الهواء.

68. (II) ما السرعة التي يجب أن يتسلّق بها راكب درّاجة هوائيّة ميلانها 6.0^{o} ليحافظ على قدرة ناجّة مقدارها 0.25 hp؟ اهمل شغل الاحتكاك. مع العلم أنّ كتلة الراكب والدرّاجة تساوي 68 kg.

69. (II) سيارة كتلتها 1200-kg، لها قدرة عظمى مقدارها 120 hp. ما درجة ميلان التلة القادرة على تسلّقها بسرعةٍ ثابتةٍ مقدارها 75 km/h إذا كانت محصلّة قوى الاحتكاك هي 650 N؟

70. (II) ما أدنى مقدار لقدرة محرّك بدلالة الأحصنة تمكّنه من دفع صندوقٍ كتلته 310-kg بمحاذاة سطحٍ أفقيٍّ بسرعة 1.20 m/s عندما يكون معامل الاحتكاك 0.45؟

71. (III) يسرعُ درّاجٌ منحدرًا إلى أسفل تلةٍ تميل بمقدار 7.0^{o} بسرعة ثابتة مقدارها 5.0 m/s. ما مقدار القدرة اللازمة للدّراج ليرتقي التلة نفسها وبالسرعة ذاتها إذا كانت كتلته مع الدراجة تعادل 75 kg؟

مسائل عامة

72. صمَّم مصمّمو السيارات الحاليين مصدّات للسيارات مرنة وقابلة للانضغاط لتعود إلى شكلها الأساسي بعد التصادم إذا لم تتجاوز سرعة السيارة 8 km/h، من غير أن تخضع لأيّ ضرر دائم. ما مقدار عامل الصلابة الفاعل للمصدّ عندما ينضغط مسافة 1.5 cm نتيجة اصطدام السيارة بحائط إذا كانت كتلة السيارة هي 1300 kg؟

73. إذا كان ارتفاع رفّ الكتب الأول في المكتبة هو 10.0 cm، وكان ارتفاع كلّ رفٍّ من الرفوف الأربعة التالية التي تعلوه هو 30.0 cm فوق الرفّ الذي يسبقه. وإذا كانت سعة كلّ رفٍّ هي 25 كتابًا بمتوسط كتلة مقدارها 1.5 kg للكتاب الواحد ذي الارتفاع 21 cm، فما الشغل الكلّي اللازم بذله لملء الرفوف جميعها بالكتب الملقاة على أرض المكتبة؟

74. ارتفع مركز كتلة أحد لاعبي القفز العالي في أولمبياد 1936 مسافة 1.1m فوق نقطة انطلاقه (الشكل 6–42). ما أقلّ سرعةٍ يجب أن يصلها اللاعب قبل أن يقفز إلى أعلى كي يصل إلى سرعة 6.5 m/s عند أعلى نقطةٍ يصلها؟

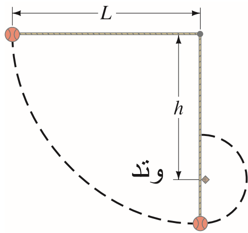


الشكل 6–42
(المسألة 74)

75. يجب أن يبقى مكعب كتلته m ملامسًا للمسار طوال الوقت خلال انزلاقه، وخصوصًا عند أعلى نقطةٍ من المسار الحلقي الدائري ذي نصف القطر r كما في (الشكل 6–39) . (أ) حدّد أقل ارتفاع h يمكن أن يحقق شرط التلامس بدلالة الكميات المعطاة (كما في المسألة 40). وإذا كان ارتفاع نقطة الانطلاق هو $2h$ فاحسب كلا من: (ب) القوّة العموديّة للمسار عند أخفض نقطةٍ من المسار الحلقي. (جـ) القوّة العموديّة للمسار عند أعلى نقطةٍ من المسار الحلقي. (د) القوّة العموديّة للمسار عندما يصبح المكعب خارج الحلقة ويتحرّك أفقيًّا على ما تبقّى من المسار.

76. هوى طيّار إلى أسفل مسافة 370 m بعد قفزه من طائرته دون أن يفتح مظلّته ليصطدم بتلّة من الثلج الخفيف وينجو بحياته بعد أن تسبّب بعمل حفرةٍ في الثلج بعمق 1.1 m. إذا كانت كتلة الطيّار 78 kg، وسرعته الحدّية 35 m/s، فقدّر كلًّا من: (أ) الشغل المبذول من الثلج لإيقاف الطيّار. (ب) متوسّط القوّة المطبقة من الثلج على الطيّار لإيقافه. (جـ) الشغل المبذول على الطيّار من مقاومة الهواء له خلال سقوطه.

77. حبل طوله L، مثبت من طرف ومعلقة به كرة من طرفه الآخر (الشكل 6–43). (أ) ما سرعة الكرة عند أخفض نقطةٍ في مسارها (الخط المتقطع)؟ (ب) إذا وضـــع وتد أسفل الطرف المثبت من الحبل بحيث تكون $h = 0.80L$، فما سرعة الكرة عندما تصل إلى أعلى نقطة ممكنة خلال مسارها الدائري حول الوتد؟



الشكل 6–43
(المسألة 77).

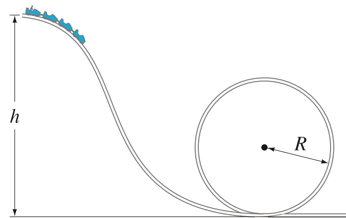
78. يحتاج متزلّج كتلته 65-kg إلى 5.0 h ليصل إلى قمّة جبل ارتفاعه 3700 m عندما يبدأ الحركة من ارتفاع 2300 m. احسب: (أ) الشغل المبذول من المتزلج ضد الجاذبية الأرضية. (ب) متوسّط القدرة الناجّة بدلالة كلٍّ من الواط والأحصنة. (جـ) افترض أن نسبة كفاءة الجسم هي 15%، احسب مقدار معدل الطاقة اللازمة المدخلة.

79. ينقطع حبل مصعد كتلته 920-kg عندما يكون المصعد على ارتفاع 38 m فوق زنبرك ضخم ($k = 2.2 \times 10^{5}$ N/m) موجود أسفل غرفة المصعد. احسب ما يلي: (أ) الشغل المبذول من الجاذبيّة الأرضيّة على المصعد قبل أن يصطدم بالزنبرك. (ب) السرعة للمصعد قبل أن يصطدم بالزنبرك. (جـ) مقدار انضغاط الزنبرك. (لاحظ الشغل المبذول بواسطة كلٍّ من الزنبرك والجاذبيّة الأرضيّة في هذا الفرع).

80. يزعم القائمون على منطقة تزلج في ولاية كاليفورنيا الأمريكيّة أن المصاعد قادرة على نقل 47،000 فرد في الساعة. إذا كان المصعد بالمتوسط ينقل الأفراد مسافة 200 m عموديًّا إلى أعلى، فما القدرة اللازمة لذلك تقديرا؟

81. تتدفق المياه ($v \approx 0$) فوق سدٍّ بمعدل 650 kg/s وتتساقط 81 m عموديا قبل أن تصطدم بشفرات عجلة شحن. احسب: (أ) سرعة المياه قبل أن تصطدم بشفرات عجلة الشحن (عند إهمال مقاومة الهواء). (ب) معدل انتقال الطاقة الميكانيكيّة إلى شفرات عجلة الشحن، مفترضا أن الكفاءة لن تزيد على 58%.

82. أثبت أن الفرق في الوزن الظاهري للراكب بين أعلى وأخفض نقطتين من المسار الدائري للأفعوانية (الشكل 6–44) هو 6 g ؛ أي أنّه يعادل 6 أضعاف وزن الراكب (بعد إهمال الاحتكاك). أثبت أيضًا أن الحلّ النهائي لا يعتمد على أبعاد المسار الدائري أو على سرعة الراكب خلال مروره بالحلقة إذا كانت سرعته أعلى من السرعة الدنيا اللازمة.



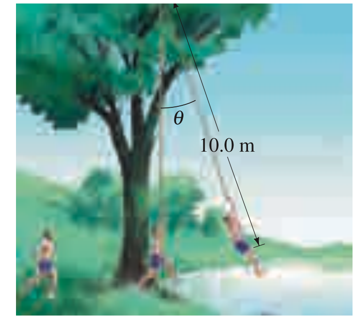
الشكل 6 – 44
(المسألة 82).

83. (أ) إذا كان الجسم البشري قادرًا على تحويل قطعة حلوى مباشرةً إلى شغل، فما أعلى ارتفاع يستطيع رجل كتلته 82-kg أن يصله عند صعوده سلّمًا بعد تناوله قطعة حلوى (كتلتها = 1100 kJ)؟ (ب) ما سرعة الرجل لحظة وصوله إلى الأرض عند قفزه من أعلى نقطةٍ يستطيع أن يصلها على السلّم؟

84. أُطلق مقذوفٌ بزاوية 45.0° إلى الأعلى من فوق سطح مبنى ارتفاعه 165-m بسرعةٍ مقدارها 175 m/s. ما سرعة المقذوف لحظة اصطدامه بالأرض؟ (استخدم قانون حفظ الطاقة مع إهمال مقاومة الهواء).

85. وقف فتى على ميزان، فظهرت القراءة 710 N نتيجة انضغاط زنبرك الميزان مسافة 0.60 mm. ما قراءة الميزان العظمى عندما يقفز الفتى نفسه عليه من ارتفاع 1.0 m؟

86. أمسك طالب كتلته 65-kg بحبل وهو يركض بسرعة 5.0 m/s ليتأرجح به فوق بركة ماء (الشكل 6–45) وليترك الحبل عندما تصبح سرعته صفرًا. (أ) ما الزاوية θ التي سيترك الطالب عندها الحبل؟ (ب) ما الشدّة في الحبل قبل تركه مباشرة؟ (جـ) ما الشدّة العظمى في الحبل؟



الشكل 6–45
المسألة 86.

87. يتسلّق رياضيٌّ كتلته 72-kg حبلًا إلى الأعلى مسافة 5.0 m خلال 9.0 s. ما مقدار القدرة اللازمة لهذا الإنجاز؟

88. تستخدم بعض شركات الكهرباء المياه لتخزين الكهرباء عن طريق ضخّ المياه بواسطة مضخّات عجلات شحن من خزّانٍ منخفضٍ إلى آخر مرتفع. ما كمية المياه بالأمتار المكعبة اللازم ضخّها خلال ساعة واحدة من الخزّان المنخفض إلى الخزّان المرتفع إذا تمّ استخدام محطة كهرباء قدرتها 120-MW $(120 \times 10^6 \text{ W})$؟ افترض أنّ الخزّان العلوي يرتفع مسافة 520 m فوق الخزّان السفلي، واهمل عمق المياه في كلا الخزانين. كتلة المياه هي 1000 kg لكل 1.0 m^3.

89. قُطع زنبرك ثابت صلابته k إلى نصفين. ما ثابت الصلابة الناتج لكلّ نصف؟

90. دُفع مكعبٌ كتلته 6.0-kg مسافة 8.0 m بمحاذاة سطحٍ يميل إلى الأعلى بزاوية 37° بواسطة قوّةٍ أفقيّة مقدارها 75 N. إذا كانت السرعة الابتدائيّة للمكعب هي 2.2 m/s، وقوّة الاحتكاك الحركيّة الثابتة المعاكسة للحركة 25 N، فاحسب: (أ) الطاقة الحركيّة الابتدائيّة للمكعب. (ب) الشغل المبذول بواسطة القوّة ذات 75-N. (جـ) الشغل المبذول بواسطة الجاذبيّة الأرضيّة. (د) الشغل المبذول بواسطة قوّة دفع السطح العموديّة. (هـ) الطاقة الحركيّة النهائيّة للمكعب.

91. إذا استطاعت سيّارة كتلتها 1500-kg أن تتسارع من 35 km/h إلى 55 km/h خلال 3.2 s، فما الزمن اللازم لكي تتسارع السيارة من 55 km/h إلى 75 km/h؟ (افترض ثبات القدرة، واهمل تأثير الاحتكاك).

92. يمشي مريضٌ خلال الفحص العام لوظائف القلب (فحص الإجهاد) على جهاز الحركة المائل إلى الأعلى (الشكل 6–46). ما القدرة التقريبية اللازمة لمريض كتلته 75-kg لإتمام الفحص بأمان إذا كانت زاوية ميلان الجهاز 15° وسرعته 3.3 km/h؟ (قارن النتيجة مع القدرة المقدرة لمصباح ضوئي).



الشكل 6 – 46 (المسألة 92).

93. (أ) إذا قُذفت صخرةٌ كتلتها 500-kg من فوهة بركانٍ مسافة 500 m إلى الأعلى، فما سرعة الصخرة الابتدائيّة لحظة خروجها من الفوهة؟ (ب) ما القدرة اللازمة لقذف 1000 صخرةٍ مماثلةٍ خلال دقيقةٍ واحدةٍ من فوهة البركان؟

94. يُسمح لكميّاتٍ كبيرةٍ من المياه أن تتساقط بمعدّل 95 kg/s من ارتفاع 2.0 m على عجلة لإنتاج الكهرباء. (أ) ما القدرة العظمى الناتجة؟ (ب) ما سرعة المياه لحظة اصطدامها بالعجلة؟

إجابات التمارين

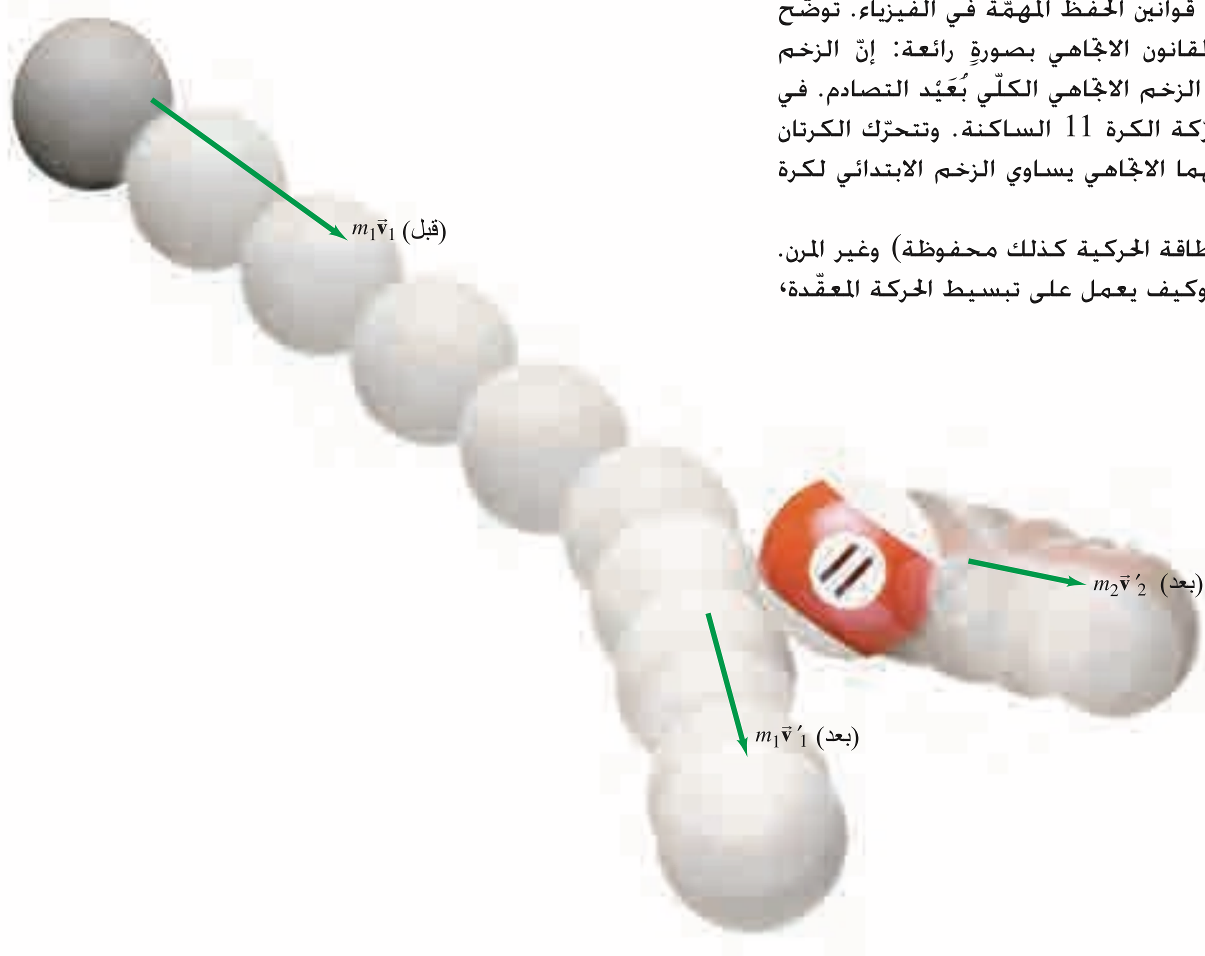
(أ): (جـ)

(ب): كلاّ؛ لأنّ السرعة v ستصبح مكافئةً للجذر التربيعي لرقم سالب، وهي كميّة غير حقيقيّة.

(جـ): إنّها كميّة غير محفوظة؛ لأن $W = 0$ لقوّةٍ محافظةٍ خلال رحلة الذهاب والإياب.

(د): محصلة الشغل = التغيّر في الطاقة الحركيّة، حيث محصّلة الشغل $= mg(y_1 - y_2)$ والتغيّر في الطاقة الحركيّة $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 =$. إذن $v_2^2 = 2g(y_1 - y_2)$.

(هـ): سرعات متعادلة.



حفظ الزخم الخطّي هو قانونٌ آخر من قوانين الحفظ المهمّة في الفيزياء. توضّح التصادمات بين كرات البلياردو هذا القانون الاتجاهي بصورةٍ رائعة: إنّ الزخم الاتجاهي الكلّي قُبَيْل التصادم يساوي الزخم الاتجاهي الكلّي بُعَيْد التصادم. في هذه الصورة، تصدم كرة البدء المتحرّكة الكرة 11 الساكنة. وتتحرّك الكرتان بعد التصادم بزوايا، ولكن جمع زخمهما الاتجاهي يساوي الزخم الابتدائي لكرة البدء القادمة.

سوف نتناول التصادمين المرن (حيث الطاقة الحركية كذلك محفوظة) وغير المرن. وسوف نتفحّص مفهوم مركز الكتلة وكيف يعمل على تبسيط الحركة المعقّدة، ويحلّلها، ويجعلها مفهومة.

الفصل 7

الزخم الخطّيّ

إنّ قانون حفظ الطاقة، الذي ناقشناه في الفصل السابق، واحدٌ من قوانين الحفظ العظيمة في الفيزياء. ومن بين الكمّيات المحفوظة الأخرى نجد كلًّا من الزخم الخطّي، والزخم الزاوي، والشحنة الكهربائية. وسوف نناقش هذه الكمّيات كلّها لأنّ قوانين الحفظ تُعدّ من أهمّ الأفكار في العلم. في هذا الفصل، سنناقش الزخم الخطّيّ وقانون حفظه. وفي الواقع، فإنّ قانون حفظ الزخم الخطّيّ هو إعادة تناول قوانين نيوتن، وهذا يوفّر لنا نظرةً فيزيائيّةً عميقة، وقدرةً على حل المسائل.

وسوف نستفيد من قوانين حفظ الزخم الخطّيّ والطاقة لتحليل التصادمات. وفي الحقيقة، فإنّ قانون حفظ الزخم الخطّيّ مفيدٌ بصورة خاصّة عند معالجة نظام من جسمين أو أكثر يتفاعلان معًا، كما هو الحال في التصادمات.

إنّ تركيزنا حتى الآن كان بصورة رئيسة على جسم واحد، مع إهمالنا دورانه أو حركته الداخلية. لذا، سنتعامل في هذا الفصل مع أنظمة من جسمين أو أكثر. وقبل نهاية الفصل، سنعالج مفهوم مركز الكتلة.

7-1 الزخم الخطِّيُّ وعلاقته بالقوّة

تعريف الزخم الخطي

الزخم الخطّيُّ (أو "الزخم" للاختصار) لجسمٍ ما يعرف بحاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته. ويمثل **الزخم بالرمز** $\vec{\mathbf{p}}$. وإذا رمزنا إلى الكتلة بـ m وللسرعة $\vec{\mathbf{v}}$ لجسمٍ معيّن، فإنّ زخم الجسم الخطّيّ $\vec{\mathbf{p}}$ يعرف بـ

$$\vec{\mathbf{p}} = m\vec{\mathbf{v}} \quad (7\text{-}1)$$

وحيث إنّ السرعة كميّة متجهة؛ لذلك يكون الزخم متجهًا أيضًا. واتجاه الزخم هو اتجاه السرعة، ومقدار الزخم هو $p = mv$. ولأنّ السرعة تعتمد على محاور مرجعية، فكذلك الزخم أيضًا. وعليه، يجب تحديد محاور مرجعيّة. كما أنّ وحدة الزخم هي وحدات كتلة × سرعة، وفي النظام الدولي SI تكون kg·m/s وليس هناك اسم خاص لهذه الوحدة.

وحدة الزخم

وينسجم الاستعمال اليومي لتعبير "زخم" مع التعريف السابق، وحسب (المعادلة 7-1)، فالسيارة السريعة زخمها أكبر من السيارة البطيئة إذا كانتا متساويتين في الكتلة. كما أنّ الشاحنة الثقيلة لها زخمٌ أكبر من سيّارةٍ صغيرةٍ تسير بالسرعة نفسها. وكلّما كان زخم الجسم أكبر كان إيقافه أكثر صعوبةً وكان الأثر الناتج من إيقافه أكبر لو تمّ ذلك بصدمه بجسمٍ آخر. إن احتمال وقوع لاعب كرة أرضاً يكون أكبر إذا هاجمه خصمٌ ثقيل يسير بأقصى سرعته ممّا لو هاجمه خصمٌ خفيفٌ يسير بسرعةٍ أقل. كما أن شاحنة ثقيلةً مسرعةً يمكنها إلحاق ضرر أكبر من درّاجة ناريّة بطيئة.

التمرين أ: هل يمكن أن يكون زخم سيّارةٍ رياضيّةٍ صغيرةٍ مساويًا لزخم سيارةٍ رياضيّةٍ كبيرةٍ كتلتها ثلاثة أمثال كتلة السيّارة الصغيرة؟ فسّر ذلك.

تلزم قوّةٌ لتغيُّر زخم جسمٍ ما، سواء لزيادة الزخم، أو لتقليله، أو لتغيير اتجاهه. وفي البداية، صاغ نيوتن قانونه الثاني بدلالة الزخم (رغم أنّه سمّى حاصل ضرب mv "كميّة التحرّك"). إنّ **صيغة نيوتن للقانون الثاني في الحركة** يترجم باللغة الحديثة كما يلي:

قانون نيوتن الثاني

إنّ معدل تغيّر زخم جسمٍ ما يساوي القوة المحصّلة المؤثِّرة فيه.

ويمكننا كتابة ذلك بهيئة معادلة

قانون نيوتن الثاني

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{p}}}{\Delta t}, \quad (7\text{-}2)$$

تنويه: التغير في متجه الزخم يكون باتجاه القوة المحصلة.

حيث $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ هي القوّة المحصّلة المؤثّرة في جسم (الجمع الاتجاهي للقوى المؤثّرة فيه جميعها)، و $\Delta\vec{\mathbf{p}}$ هو التغيّر الناتج في الزخم الذي يحصل خلال الفترة الزمنية * Δt.

يمكننا بسهولة اشتقاق الصيغة المعتادة للقانون الثاني، $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$، من (المعادلة 7-2) في حالة ثبات الكتلة. إذا كانت $\vec{\mathbf{v}}_1$ السرعة الابتدائيّة لجسمٍ ما و $\vec{\mathbf{v}}_2$ هي سرعته بعد فترةٍ زمنية Δt، فإنّ

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{p}}}{\Delta t} = \frac{m\vec{\mathbf{v}}_2 - m\vec{\mathbf{v}}_1}{\Delta t} = \frac{m(\vec{\mathbf{v}}_2 - \vec{\mathbf{v}}_1)}{\Delta t}$$

$$= m\frac{\Delta\vec{\mathbf{v}}}{\Delta t}$$

وبتعريف $\vec{\mathbf{a}} = \Delta\vec{\mathbf{v}}/\Delta t$ يصبح

قانون نيوتن الثاني لكتلة ثابتة.

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}} \quad \text{[الكتلة ثابتة]}$$

إنّ صيغة نيوتن في (المعادلة 7-2) أكثر شموليةً من الصيغة المعتادة؛ لأنّها تتضمّن الوضع الذي تكون فيه الكتلة متغيّرة. ويحدث تغيّر الكتلة في ظروف معينة، مثل الصواريخ التي تفقد كتلة عند احتراق الوقود، وكذلك في نظرية النسبية (الفصل 26).

* عادةً ما نفكّر بـ Δt باعتبارها فترةً زمنية ز/واحدة صغيرة. واذا لم تكن كذلك فان (المعادلة 7-2)تكون صحيحة في حال كان المقدار $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ ثابتا خلال تلك الفترة الزمنية $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ تساوي متوسّط القوّة المحصّلة خلال تلك الفترة الزمني.

مثال 1-7 قدّر قوّة إرسال كرة تنس.



الشكل 1-7 (المثال 1-7)

يمكن لكرة التنس (المضرب) أن تترك المضرب في عمليّة الإرسال بسرعة 55 m/s (حوالي 120 mi/h)، (الشكل 1-7). إذا كانت كتلة الكرة 0.060 kg وتلامس المضرب لمدّة، $(4 \times 10^{-3}\ s)$ 4 ms فاحسب متوسّط القوّة المؤثّرة في الكرة. هل ستكون هذه القوّة كافيةً لرفع شخصٍ كتلته 60-kg؟

النهج: تضرب كرة التنس عندما تكون سرعتها الابتدائية صفرًا تقريباً عند قمّة مسارها، لذلك نفترض أنّ $v_1 = 0$ ونستعمل قانون نيوتن الثاني، (المعادلة 2-7)، لحساب القوّة، مع إهمال القوى الأخرى مثل الجاذبيّة (الوزن) بالمقارنة مع تلك الناجّة من مضرب التنس.

الحل: القوّة المؤثّرة في الكرة بواسطة المضرب تساوي

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t}$$

وحيث $v_2 = 55\ m/s, v_1 = 0$، كذلك $\Delta t = 0.004\ s$،
فإنّ

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{(0.060\ kg)(55\ m/s) - 0}{0.004\ s}$$

$$\approx 800\ N.$$

إنّ هذه قوّةٌ كبيرة، أكبر من وزن شخصٍ كتلته 60-kg: حيث تلزم قوّة $mg = (60\ kg)(9.8\ m/s^2) \approx 600\ N$ لرفعه.

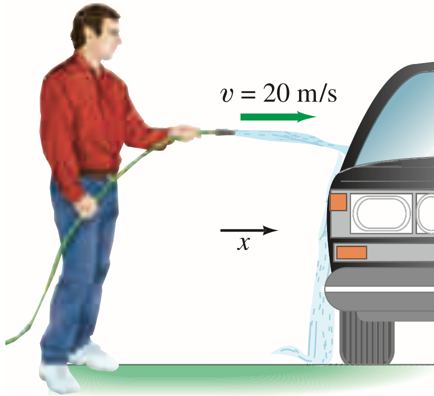
ملحوظة: قوّة الجاذبيّة المؤثّرة في كرة التنس هي:
$mg = (0.060\ kg)(9.8\ m/s^2) = 0.59\ N$ وهذا يبرّر إهمالنا لهذه القوّة بالمقارنة مع القوّة الكبيرة التي يولدها المضرب.

حساب القوة

ملحوظة: إنّ التصوير بسرعةٍ كبيرةٍ، والرادار يمكن أن يعطينا حسابًا تقريبيًّا لزمن التلامس وسرعة الكرة عند مغادرتها المضربَ. ولكن قياسًا مباشرًا مع القوّة يُعدّ غير عملي. لقد بيّنت حساباتنا أسلوبًا يدويًّا لتحديد قوّةٍ مجهولةٍ في عالم حقيقي.

المثال 2-7 غسيل السيارة: تغيُّر الزخم والقوّة.

الشكل 2-7 (المثال 2-7)



ينطلق الماء من الأنبوب بمعدّل 1.5 kg/s وبسرعة 20 m/s، حيث يوجه نحو جانب السيّارة الذي يوقفه، (الشكل 2-7) (أي أنّنا نهمل أيَّ رذاذ نحو الخلف). ما القوّة المتولّدة من الماء على السيّارة؟

النهج: الماء الذي ينطلق من الأنبوب له كتلة وسرعة، ولذلك له زخم ابتدائي *Pinitial*. وعند ارتطام الماء بالسيارة، يفقد الماء هذا الزخم $(P_{final} = 0)$. ثم نستعمل قانون نيوتن الثاني بصيغة الزخم، (المعادلة 2-7) لإيجاد القوّة التي تؤثّر فيها السيّارة في الماء لإيقافه. ومن قانون نيوتن الثالث، القوّة المتولّدة من الماء على السيارة تساوي وتعاكس قوّة السيّارة على الماء. لدينا عمليّة متصلة: 1.5 kg من الماء ينطلق من الأنبوب في ثانية واحدة. لذلك دعنا نختار $\Delta t = 1.0\ s, m = 1.5\ kg$ في (المعادلة 2-7).

الحل: نفترض اتّجاه x موجبًا نحو اليمين. في كلّ ثانية يتمّ إيقاف كمية من الماء زخمها:

$$p_x = mv_x = (1.5\ kg)(20\ m/s) = 30\ kg \cdot m/s$$

عند اصطدامها بالسيّارة.

إن مقدار القوة (بفرض أنّها ثابتة) التي تولدها السيّارة لتغيير زخم الماء بهذا المقدار هو:

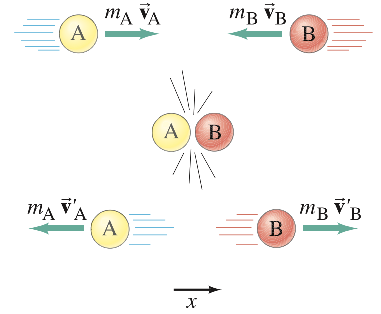
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{final} - p_{initial}}{\Delta t} = \frac{0 - 30\ kg \cdot m/s}{1.0\ s} = -30\ N$$

تشير الإشارة السالبة إلى أنّ القوّة المؤثّرة في الماء تعاكس سرعة الماء الأصلية. تولّد السيّارة قوّة 30 N إلى اليسار لإيقاف الماء، وهكذا من قانون نيوتن الثالث، يؤثّر الماء بقوّة 30 N إلى اليمين في السيّارة.

ملحوظة: الزم طريق الإشارات، رغم أن الحسَّ العامَّ يساعد أيضًا.. يتحرّك الماء نحو اليمين، ولذلك الحس العامّ يخبرنا بأنّ القوّة على السيّارة ستكون إلى اليمين.

التمرين ب: إذا ارتدّ رذاذ الماء نحو الخلف من السيارة في (المثال 2-7)، فهل ستكون القوّة على السيّارة أكبر أم أقل؟

2-7 حفظ الزخم



الشكل 7-3 الزخم الخطي محفوظ في تصادم كرتين معلمتين بـ A و B.

حفظ الزخم لجسمين متصادمين

يُعدّ مفهوم الزخم مهمًّا لأنّه يكون محفوظاً تحت ظروف معينة. اعتبر مثلًا التصادم المباشر بين كرتي بلياردو، كما هو مبيّن في (الشكل 7-3). نفرض أنّ القوّة المحصلة الخارجية المؤثرة في هذا النظام من الكرتين تساوي صفرًا؛ أي أنّ القوّتين المهمّتين في أثناء التصادم هما القوتان اللتان تؤثّر فيهما كلُّ كرةٍ في الكرة الأخرى. بالرغم من تغيّر الزخم لكلٍّ من الكرتين نتيجة التصادم، فإنّ مجموع زخميهما بعد التصادم يكون مساويًا لذلك قبل التصادم. فإذا كان $m_A \vec{v}_A$ هو زخم الكرة A و $m_B \vec{v}_B$ هو زخم الكرة B، كما يقاسا قبيل التصادم، فإنّ الزخم الكلّي للكرتين قبل التصادم هو المجموع الاتجاهي $m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B$. وحالًا بعد التصادم؛ فالكرتان لهما سرعتان وزخمان مختلفان، ونرمز إليهما بـ "prime" (فتحة) على السرعة: $m_A \vec{v}'_A + m_B \vec{v}'_B$

بغضّ النظر عن قيم الكتلة والسرعة، تبيّن التجربة أنّ الزخم الكلّي قبل التصادم يساوي الزخم الكلّي بعد التصادم، سواء أكان التصادم مباشرًا أم لا، ما دام تأثير القوى الخارجيّة معدومًا:

الزخم قبل التصادم = الزخم بعد التصادم

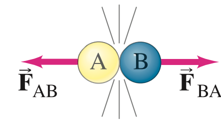
$$m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B = m_A \vec{v}'_A + m_B \vec{v}'_B \qquad \textbf{(3-7)}$$

أي أنّ الزخم الكلّي الاتجاهي لنظامٍ مكوّنٍ من كرتين متصادمتين يكون محفوظًا: (يبقى ثابتًا).

علاقة حفظ الزخم بقوانين نيوتن

رغم أن قانون حفظ الزخم اكتشف بواسطة التجربة، فإنّه يرتبط ارتباطًا وثيقًا بقوانين نيوتن في الحركة، ويمكن إيضاح أنّهما متكافئان. سوف نجري اشتقاقًا لتصادم مباشر، كالتصادم المبيّن في (الشكل 7-3). نفرض القوّة F التي تولدها إحدى الكرتين على الأخرى خلال التصادم تكون ثابتة خلال فترة التماس (التصادم) Δt. نستعمل قانون نيوتن الثاني كما في (المعادلة 7-2) ونعيد كتابته بعد ضرب الطرفين في Δt.

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}\, \Delta t. \qquad \textbf{(4-7)}$$



الشكل 7-4 القوى بين الكرتين خلال التصادم في (الشكل 7-3)

نطبّق ذلك على الكرة B وحدها، مع ملاحظة أنّ القوّة $\vec{F}_{BA}$ على الكرة B ناتجةٌ من الكرة A خلال التصادم نحو اليمين اتّجاه x + (انظر الشكل 7-4):

$$\Delta \vec{p}_B = \vec{F}_{BA}\, \Delta t$$
$$m_B \vec{v}'_B - m_B \vec{v}_B = \vec{F}_{BA}\, \Delta t$$

من قانون نيوتن الثالث، القوة $\vec{F}_{AB}$ على الكرة A بسبب الكرة B تساوي $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$، وتؤثر نحو اليسار. ثم بتطبيق قانون نيوتن الثاني بالطريقة نفسهاعلى الكرة A يؤدي إلى:

$$\Delta \vec{p}_A = \vec{F}_{AB}\, \Delta t$$

أي

$$m_A \vec{v}'_A - m_A \vec{v}_A = \vec{F}_{AB}\, \Delta t$$
$$= -\vec{F}_{BA}\, \Delta t$$

نجمع معادلتي $\Delta \vec{p}$ (جانبهما الأيمن يختلف فقط بإشارة سالبة):

$$m_A \vec{v}'_A - m_A \vec{v}_A = -(m_B \vec{v}'_B - m_B \vec{v}_B)$$

أي

$$m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B = m_A \vec{v}'_A + m_B \vec{v}'_B$$

وهذه هي (المعادلة 7-3)؛ أي قانون حفظ الزخم الخطّي.

الاشتقاق السابق يمكن توسيعه ليشمل أي عدد من الأجسام المتفاعلة. ولتوضيح ذلك، افرض أنّ $\vec{p}$ في (المعادلة 7-2) يمثل الزخم الكلي للنظام؛ أي يساوي الجمع الاتجاهي لزخم كلّ جسمٍ في النظام. (لنظام جسمين السابق $\vec{p} = m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B$.) إذا كانت القوّة المحصّلة $\Sigma \vec{F}$ على النظام تساوي صفرًا [كما هو الحال في نظامنا الثنائي السابق, $\vec{F} + (-\vec{F}) = 0$]. ومن ثَمّ (المعادلة 7-2)، $\Delta \vec{p} = \vec{F}\, \Delta t = 0$

قانون حفظ الزخم الخطي

وهكذا لا يتغيّر الزخم الكلّي. وعليه، فإنّ النصّ العام لقانون حفظ الزخم الخطّي هو: **الزخم الكلّي لنظام أجسامٍ معزول يبقى ثابتًا.**

أنظمة

نظام معزول

إنّ كلمة **نظام** تعني ببساطة مجموعةً من الأجسام التي نختارها، ويمكن أن تتفاعل معًا. **النظام المعزول** هو ذلك النظام الذي تكون فيه القوى المهمّة هي تلك المتبادلة بين أجسام النظام. مجموع هذه القوى "الداخلية" ضمن النظام كلّها سيكون صفرًا بسبب قانون نيوتن الثالث. ولو كانت هناك قوى خارجية- أي القوى المؤثّرة من أجسام خارج مجموعة النظام- لا تساوي صفرًا عند جمعها اتجاهيًّا، فإن الزخم الكلي لايكون محفوظًا. ولكن إذا أُعيد تعريف النظام بحيث يشمل الأجسام الأخرى التي تولّد هذه القوى، عندها يمكن تطبيق مبدأ حفظ الزخم. فعلى سبيل المثال، لو أخذنا من نظامنا صخرةً تسقط تحت تأثير الجاذبيّة، فإنّ زخم هذا النظام غير محفوظ: حيث القوّة الخارجيّة هي قوّة الجاذبيّة الناتجة من الأرض، وهذه تغيّر الزخم. ولكن، لو أنّ نظامنا تضمَّن الأرض أيضًا، فسيكون الزخم الكلي للصخرة والأرض محفوظًا. (هذا يعني أن الأرض ترتفع لتقابل الصخرة، لكنّ كتلة الأرض كبيرةٌ جدا، لدرجة أن سرعتها نحو الأعلى تكون صغيرةً جدًّا).

المثال 7-3 تصادم عربات القطار: الزخم محفوظ.

تسير عربة قطار A كتلتها 10,000-kg بسرعة 24.0 m/s تصطدم بعربةٍ مماثلة B ساكنة. إذا ارتبطت العربتان معًا نتيجة التصادم، فاحسب سرعتهما المشتركة بعد ذلك مباشرة. (انظر الشكل 7-5).

النهج: نظامنا مكوّن من العربتين. ثُمّ نعتبر فترةً زمنيّةً صغيرةً من قُبيل التصادم إلى بُعيْد التصادم، بحيث يمكن إهمال القوى الخارجية كالاحتكاك، ومن ثمّ نطبق قانون حفظ الزخم.

الحل: الزخم الكلي الابتدائي هو

$$p_{\text{initial}} = m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A$$

لأنّ العربة B كانت ساكنة ($v_B = 0$). الاتجاه نحو اليمين أي $+x$. بعد التصادم، ارتبطت العربتان، وهكذا سيكون لهما السرعة نفسها، ونسميها v'. أي أن الزخم الكلّي بعد التصادم يساوي

$$p_{\text{final}} = (m_A + m_B)v'$$

لقد افترضنا أن لا وجود لقوًى خارجيّةٍ مؤثّرة، وعليه يكون الزخم محفوظ:

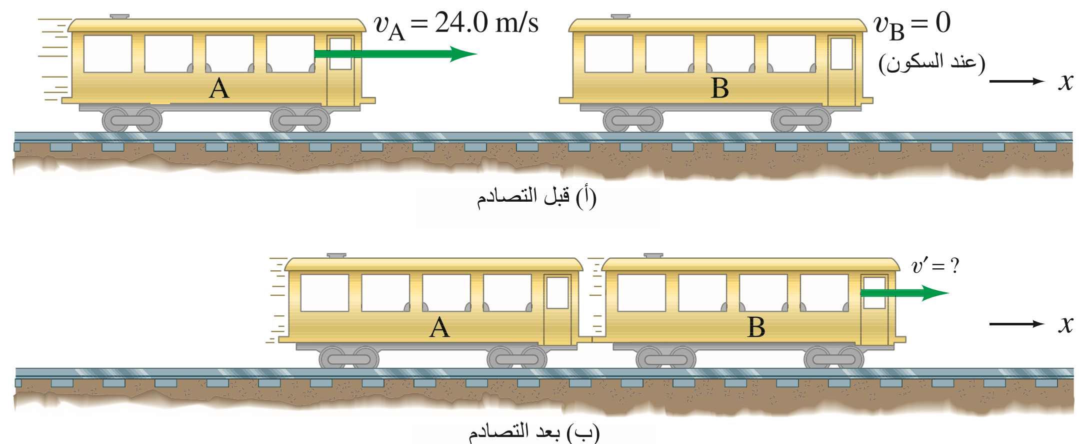
$$p_{\text{initial}} = p_{\text{final}}$$
$$m_A v_A = (m_A + m_B)v'$$

لإيجاد v'

$$v' = \frac{m_A}{m_A + m_B} v_A = \left(\frac{10{,}000 \text{ kg}}{10{,}000 \text{ kg} + 10{,}000 \text{ kg}}\right)(24.0 \text{ m/s}) = 12.0 \text{ m/s}$$

نحو اليمين: سرعتهما المشتركة بعد التصادم تساوي نصف سرعة العربة A قبل التصادم.

ملحوظة: احتفظنا بالرموز حتى النهاية، وهكذا لدينا معادلة يمكن استخدامها في مواقف مشابهة.



الشكل 7-5 (المثال 7-3)

تمرين جـ: في (المثال 7-3)، $m_A = m_B$، ولذلك في المعادلة الأخيرة $m_A/(m_A + m_B) = \frac{1}{2}$. وهكذا فإنّ $v' = \frac{1}{2}v_A$ ما النتيجة التي تحصل عليها إذا: (أ) $m_B = 3m_A$؟ (ب) كانت m_B أكبر بكثير من m_A ($m_B \gg m_A$) و (جـ) $m_B \ll m_A$؟

وفي غياب قوًى خارجيّةٍ تؤثّر في نظامنا، فإنّ حفظ الزخم يكون ساري المفعول. وفي الواقع، فإنّ هناك قوًى خارجيّةً مؤثرة: قوة الاحتكاك على كرة البلياردو، وقوّة الجاذبيّة على البيسبول، وهكذا. ولذلك يبدو أنّ حفظ الزخم لا يمكن تطبيقه. أو هل يمكن ذلك؟ في التصادم، فإنّ القوّة التي يؤثّر فيها كلّ جسمٍ في الآخر تعمل لفترةٍ زمنيّةٍ وجيزةٍ وتكون كبيرةً جدًا. عندما يضرب المضرب كرة التنس (أو البيسبول)، فقبل "التصادم" وبعده تسير الكرة كمقذوفٍ تحت تأثير الجاذبيّة والاحتكاك مع الهواء. وخلال فترة التصادم القصيرة، عندما يضرب الكرة، نجد أنّ القوى الخارجية (الجاذبية والاحتكاك) تكون غير ذات معنى بالمقارنة مع قوى التصادم المتبادلة بين المضرب والكرة. ولذلك، إذا قسنا الزخم قبيل التصادم وبعده فيمكننا تطبيق حفظ الزخم بدقّةٍ كبيرة.

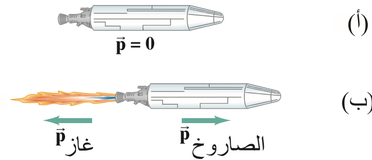
تطبيق الفيزياء
دفع الصاروخ

إن لقانون حفظ الزخم أهميّةً خاصةً عندما نتعامل مع أنظمة بسيطة، مثل تصادم الأجسام أو بعض أنواع "الانفجارات". كالدفع الصاروخي الذي رأيناه في الفصل الرابع؛ حيث يمكن فهمه على أساس الفعل وردّ الفعل. ويمكن أيضًا معالجته على أساس حفظ الزخم. يمكننا اعتبار الصاروخ والوقود كنظامٍ معزولٍ إذا كانا بعيدين في الفضاء (لا يوجد قوى خارجيّة). في نظام محاور الصاروخ، يبقى الزخم الخطيّ الكلّي ثابتاً: الزخم نحو الخلف للغازات العادمة يعادله الزخم الأمامي للصاروخ نفسه (انظر الشكل 7-6). وهكذا يتسارع الصاروخ في الفضاء. وليست هناك حاجةٌ لأنّ تضغط الغازات العادمة على الأرض أو الهواء (كما يعتقد خطأً أحيانًا). أمثلة مشابهة لأنظمة معزولة (تقريبًا) حين يكون الزخم محفوظًا، هي ارتداد البندقية عند إطلاق رصاصة، وكذلك حركة القارب عند قذف رزمةٍ خارجه.

تنويه:
يضغط الصاروخ على الغازات المنطلقة وليس على الأرض أو أجسام أخرى.

(أ)

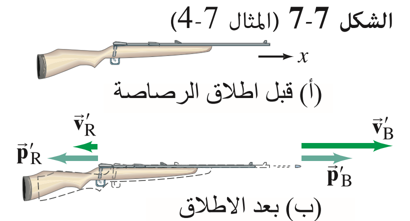
(ب)



الشكل 7-6 (أ) صاروخ يحمل وقودًا، في حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة من المحاور. (ب) في مجموعة المحاور نفسها ينطلق الصاروخ وتندفع الغازات بسرعةٍ كبيرةٍ من الخلف. الزخم الكلّي المتجه $\vec{p}_{\text{الصاروخ}} + \vec{p}_{\text{غاز}}$ يبقى صفرا.

المثال 7-4 ارتداد البندقية.

احسب سرعة ارتداد بندقية كتلتها 5.0-kg تطلق طلقةً كتلتها 0.020-kg بسرعة 620 m/s (الشكل 7-7).



الشكل 7-7 (المثال 7-4)

النهج: نظامنا مكوّن من البندقيّة والطلقة، كلاهما ساكن أولًا، قبيل الضغط على الزناد. عند ضغط الزناد، يحصل انفجار. وننظر إلى البندقية والقذيفة عند لحظة خروج الطلقة من الفوهة، تتحرك الطلقة إلى اليمين ($+x$)، وترتد البندقية نحو اليسار.

وخلال فترة الانفجار القصيرة جدًّا، يمكننا اعتبار القوى الخارجية صغيرةً بالمقارنة مع القوى الناتجة من انفجار ملح البارود. وبهذا يمكننا تطبيق حفظ الزخم، على الأقل بالتقريب.

الحل: افرض أنّ B تمثّل الطلقة و R تمثّل البندقيّة، تمثّل السرعة النهائية بفتحة. يعطينا حفظ الزخم باتجاه x.

الزخم قبل الانفجار = الزخم بعد الانفجار

$$m_B v_B + m_R v_R = m_B v'_B + m_R v'_R$$
$$0 + 0 = m_B v'_B + m_R v'_R$$

$$v'_R = -\frac{m_B v'_B}{m_R} = -\frac{(0.020\,\text{kg})(620\,\text{m/s})}{(5.0\,\text{kg})} = -2.5\,\text{m/s}.$$

بما أنّ كتلة البندقيّة أكبر بكثير، فإن سرعة ارتدادها تكون أصغر بكثيرٍ من سرعة الطلقة. تشير إشارة السالب إلى أن سرعة (زخم) البندقيّة تكون باتجاه محور x السالب، وذلك عكس سرعة الطلقة.

المثال المفاهيمي 7-5 **السقوط على زلّاجة أو منها.**

(أ) تنزلق زلّاجةٌ فارغةٌ على جليدٍ عديم الاحتكاك عندما تسقط ليلى عموديًّا من شجرةٍ فوق الزلّاجة. عندما تهبط على الزلّاجة، هل تزيد سرعة الزلّاجة؟ أم تنقص. أم تبقى ثابتة؟ (ب) لاحقًا، تسقط ليلى جانبيًّا من على الزلّاجة، هل تزيد سرعة الزلّاجة؟ أم تنقص؟ أم تحتفظ بسرعتها ثابتة؟

الإجابة (أ) لأنّ ليلى تسقط عموديًّا، فليس لها زخمٌ أفقيٌّ ابتدائي. لذلك يبقى الزخم الأفقيُّ الكلّيّ محفوظًا؛ أي قبل سقوطها وبعده. وبما أنّ كتلة النظام (الزلّاجة + ليلى) زادت، فإنّ السرعة يجب أن تقل.

(ب) في لحظة سقوط ليلى بالسرعة الأفقية نفسها التي كانت تتحرّك وهي على الزلّاجة. أي لها الزخم نفسه الذي كان لها قبل لحظة. وبما أن الزخم محفوظ، إذن، تحتفظ الزلّاجة بسرعتها ثابتة.

7-3 التصادمات والدفع



الشكل 7-8 مضرب التنس يضرب كرة التنس. كلا من الكرة وشبكة المضرب يتغير شكلهما بسبب القوة الكبيرة التي يؤثر فيها أحدهما في الآخر.

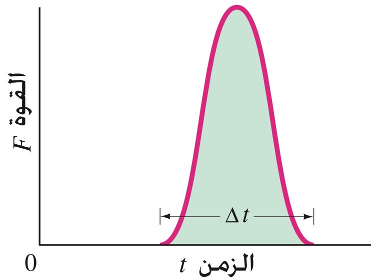
التصادمات حدثٌ دارجٌ في الحياة اليومية: مضرب التنس أو البيسبول يضرب الكرة، كرات البلياردو تصطدم، مطرقة تدق مسمارًا. عند التصادم، فإنّ التفاعل المتبادل بين الأجسام المشتركة في التصادم يكون عادةً أكبر بكثيرٍ من أي تفاعلٍ بين النظام والمحيط. عندها، يمكننا إهمال أيّ قوى أخرى خلال فترة التصادم الوجيزة.

خلال تصادم جسمين عاديين، فإنّ كلا الجسمين يتشوّهان، وعادةً بصورةٍ كبيرة؛ نظرًا للقوى الكبيرة المشتركة (الشكل 7-8). وعند وقوع التصادم، تقفز القوة من الصفر في لحظة التماس إلى قوةٍ كبيرةٍ خلال فترة صغيرة جدًّا، ثم تعود بسرعةٍ إلى الصفر ثانية. وهناك رسمٌ لمقدار القوة التي يؤثر فيها أحد الجسمين في الآخر خلال التصادم بدلالة الزمن تشبه المنحنى الأحمر في (الشكل *7-9*).

الفترة الزمنية Δt تكون عادةً واضحةً وصغيرةً جدًّا.

ومن قانون نيوتن الثاني، (المعادلة 7-2)، القوة المحصلة على الجسم تساوي معدّل تغيّر زخمه الخطّيّ:

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{p}}}{\Delta t}.$$



الشكل 7-9 القوة بدلالة الزمن خلال تصادم نموذجي.

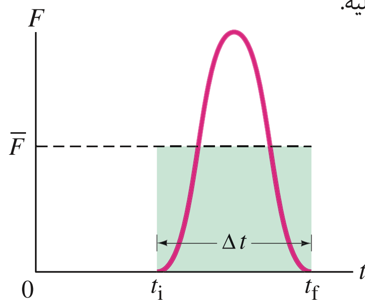
(كتبنا $\vec{\mathbf{F}}$ بدلًا من $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ لتدلّ على القوّة المحصلة، التي نفرض أنّها بصورةٍ كاملةٍ تعود إلى القوّة الكبيرة التي تؤثر خلال التصادم). تنطبق هذه المعادلة على كلٍّ من الجسمين خلال التصادم. نضرب طرفي هذه المعادلة في الفترة الزمنية Δt، ونحصل على:

$$\vec{\mathbf{F}}\,\Delta t = \Delta\vec{\mathbf{p}}. \quad \textbf{(5-7)}$$

الكميّة على يسار المعادلة؛ أي حاصل ضرب القوة $\vec{\mathbf{F}}$ بالفترة الزمنية Δt التي تؤثر خلالها القوة، تدعى الدفع ويرمز إليها بـ I:

$$I = \vec{\mathbf{F}}\,\Delta t.$$

نرى أنّ التغيّر في الزخم يساوي الدفع. يُعدّ مفهوم الدفع مهمًّا خاصةً للقوّة التي تؤثّر لفترةٍ وجيزةٍ مثل المضرب يضرب كرة البيسبول. القوة بصورة عامة ليست ثابتة، وعادةً يكون تغيّرها مع الزمن كما هو مبيّن في (الشكل 7-10).



الشكل 7-10 القوة المتوسطة $\bar{F}$ تؤثر خلال فترة زمنية Δt تعطي الدفع نفسه ($\bar{F}\,\Delta t$) كالقوة الفعلية.

ويمكننا عادةً تقريب تلك القوّة المتغيّرة بقوّةٍ متوسّطة $\bar{F}$ تؤثّر خلال الفترة Δt، كما هو مشار إليه بالخط المتقطع في (الشكل 7-10). نختار $\bar{F}$ بحيث تكون المساحة المظلّلة في (الشكل 7-10) (تساوي $\bar{F} \times \Delta t$) مساويةً للمساحة تحت المنحنى الذي يمثّل F مع الزمن t (الشكل 7-9) (الذي يمثّل الدفع الفعلي).

التمرين د: افرض أنّ (الشكل 7-9)يمثّل القوّة على كرة جولف مع الزمن عندما تصطدم الكرة بالحائط . كيف يتغيّر هذا الشكل عندما تصطدم كرةٌ مطاطيّة أكثر ليونةً بالحائط ولها الكتلة والسرعة نفسها.

تطبيق الفيزياء
كيف نتجنب كسر الساق

المثال 6-7 اثنِ ركبتيك عند الهبوط على الأرض.

(أ) احسب الدفع الناتج عندما يصطدم شخصٌ كتلته 70-kg بأرضٍ صلبةٍ إذا قفز من ارتفاع 3.0 m. (ب) احسب قيمةً تقريبيّةً لمتوسّط القوّة المؤثّرة في قدمي الشخص من الأرض إذا كان الهبوط والساقان ممدودتان، ثم احسب القوة (جـ) والساقان مثنيتان. افرض أنّ الجسم تحرّك 1.0 cm خلال الارتطام والساقان ممدودتان، وحوالي 50 cm والساقان مثنيّتان.

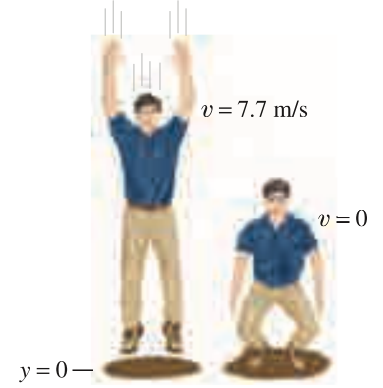
النهج: خلال الفترة الزمنيّة القصيرة التي تبدأ قُبيل ارتطامه بالأرض وتنتهي عندما يصل إلى حالة السكون، تولّد الأرض قوّةً عليه وتعطيه دفعًا مساويًا للتغيّر في زخمه (المعادلة 7-5). للجزء (أ) فإنّنا نعلم أنّ سرعته النهائية (صفر؛ لأنّه يصل إلى السكون)، لكنّنا بحاجةٍ إلى حساب سرعته الابتدائية قُبيل ملامسته للأرض. إنّ الأخيرة بحاجةٍ إلى معادلات الحركة، وأنه سقط من ارتفاع 3.0 m. ثم تعطينا (المعادلة 7-5) $F\Delta t$. في الجزأين (ب) و (جـ) تحسب طول الفترة Δt التي استغرقته ليتباطأ عند اصطدامه بالأرض باستعمال معادلات الحركة، ومن ثم نحسب F حيث إننا نعرف $F\Delta t$.

الحل: (أ) نحتاج أولًا إلى تحديد سرعة الشخص قُبيل اصطدامه بالأرض باعتبار الفترة الزمنية منذ بدء سقوطه من ارتفاع 3.0 m وحتى قُبيل ملامسته الأرضَ. ولأنّ الشخص يسقط تحت تأثير الجاذبيّة، فإنّنا سنستخدم (المعادلة 2-11 جـ) $v^2 = v_0^2 + 2a(y - y_0)$ حيث $a = -g$ و $v_0 = 0$، أي

$$v^2 = 2g(y_0 - y)$$

أو

$$v = \sqrt{2g(y_0 - y)} = \sqrt{2(9.8\,\text{m/s}^2)(3.0\,\text{m})} = 7.7\,\text{m/s}.$$



الشكل 7-11 (المثال 7-6) الفترة الزمنية التي يؤثر خلالها الدفع.

هذه $v = 7.7\,\text{m/s}$ هي سرعته قبيل اصطدامه بالأرض، ولذلك فهي السرعة الابتدائية للفترة الزمنية القصيرة للتصادم مع الأرض Δt. والآن، يمكننا تحديد الدفع بفحص هذه الفترة الزمنية القصيرة عندما يضرب الشخص الأرض ويصل إلى السكون (الشكل 7-11). إنّنا لا نعرف القوة F. لذا، فإنّنا لا نستطيع حساب الدفع $F\Delta t$ مباشرة؛ بل يمكننا استعمال(المعادلة 7-5): الدفع يساوي التغيّر في زخم الجسم

$$\bar{F}\,\Delta t = \Delta p = m\,\Delta v$$
$$= (70\,\text{kg})(0 - 7.7\,\text{m/s}) = -540\,\text{N}\cdot\text{s}.$$

تخبرنا إشارة السالب أنّ القوّة تعاكس الزخم الأصلي (نحو الأسفل)؛ أي أنّ القوّة تعمل نحو الأعلى.

(ب) خلال وصوله إلى السكون، فإنّ الشخص يتباطأ من 7.7 m/s إلى صفر في مسافة $d = 1.0\,\text{cm} = 1.0 \times 10^{-2}\,\text{m}$. وإذا فرضنا أنّ القوّة المؤثّرة فيه من الأرض ثابتة، فإنّ سرعته المتوسّطة خلال هذه الفترة القصيرة تساوي

$$\bar{v} = \frac{(7.7\,\text{m/s} + 0\,\text{m/s})}{2} = 3.9\,\text{m/s}.$$

وهكذا، فإنّ التصادم مع الأرض يستغرق فترةً زمنية (تذكر تعريف السرعة $\bar{v} = d/\Delta t$):

$$\Delta t = \frac{d}{\bar{v}} = \frac{(1.0 \times 10^{-2}\,\text{m})}{(3.9\,\text{m/s})} = 2.6 \times 10^{-3}\,\text{s}.$$

وحيث إن مقدار الدفع $\bar{F}\,\Delta t = 540\,\text{N}\cdot\text{s}$، $\Delta t = 2.6 \times 10^{-3}\,\text{s}$ فإن متوسّط القوّة المحصّلة $\bar{F}$ على الشخص مقدارها

$$\bar{F} = \frac{540\,\text{N}\cdot\text{s}}{2.6 \times 10^{-3}\,\text{s}} = 2.1 \times 10^5\,\text{N}$$

حلّ المسألة.
تكون مخططات الجسم الحر مفيدة دائمًا.

نكون قد وصلنا، $\bar{F}$ تساوي الجمع الاتجاهيّ للقوّة المتوسّطة نحو الأعلى على الأرجل متولّدة من الأرض، F_{grd}، والتي نأخذها موجبة، بالإضافة إلى قوّة الجاذبيّة نحو الأسفل $-mg$ (انظر الشكل 7-12):

$$\bar{F} = F_{grd} - mg$$

وبما أن $mg = (70\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 690\,\text{N}$، فإن

$$F_{grd} = \bar{F} + mg = (2.1 \times 10^5\,\text{N}) + (0.690 \times 10^3\,\text{N}) \approx 2.1 \times 10^5\,\text{N}$$

(جـ) هذا يشبه الجزء (ب)، ما عدا أن $d = 0.50\ \mathrm{m}$، وهكذا

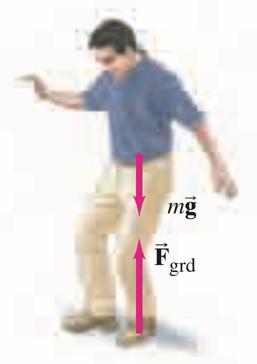
$$\Delta t = \frac{d}{\bar{v}} = \frac{0.50\ \mathrm{m}}{3.9\ \mathrm{m/s}} = 0.13\ \mathrm{s}$$

$$\bar{F} = \frac{540\ \mathrm{N \cdot s}}{0.13\ \mathrm{s}} = 4.2 \times 10^3\ \mathrm{N}.$$

والقوّة نحو الأعلى من الأرض على قدمي الشخص كما في الجزء (ب):

$$F_{grd} = \bar{F} + mg = (4.2 \times 10^3\ \mathrm{N}) + (0.69 \times 10^3\ \mathrm{N}) = 4.9 \times 10^3\ \mathrm{N}.$$

ومن الواضح، أنَّ القوَّة على القدمين الآن أصغر بكثيرٍ عندما تكون الركبتان مثنيتين، ويحدث الدفع خلال فترةٍ زمنيّةٍ أطول. وفي الحقيقة، فإنّ متانة عظم الساقين (انظر الفصل 9، الجدول 9-2) ليست كبيرة لدرجة تستطيع تحمّل القوّة المحسوبة في الجزء (ب) ولذا يحتمل كسر الساق في مثل هذا النزول بساقين ممدودتين، في حين لا يحتمل ذلك في الجزء (جـ) لأنّ الركبتين مثنيتان.



الشكل 7-12(المثال 7-6)
عندما يهبط الشخص على الأرض، فإن القوة المحصلة المتوسطة خلال التصادم تساوي $\bar{F} = F_{grd} - mg$ بحيث F_{grd} القوة التي تولدها الأرض على الشخص نحو الأعلى.

التمرين هـ: وفي الجزء (ب) من (المثال 7-6)، حسبنا القوة التي تؤثر فيها الأرض في شخصٍ خلال التصادم، F_{grd}. هل كانت F_{grd} أكبر بكثيرٍ من القوّة "الخارجيّة" للجاذبيّة على الشخص؟ بأيّ نسبةٍ كان ذلك؟

7-4 حفظ الطاقة والزخم في التصادمات

خلال معظم التصادمات، فإنّنا عادةً لا نعرف كيفيّة تغيّر القوّة خلال الزمن. وهكذا، فإنّ التحليل باستخدام قانون نيوتن الثاني يصبح صعبًا أو مستحيلًا. وباستعمال قوانين حفظ الطاقة والزخم، لا زلنا نستطيع معرفة الكثير حول الحركة بعد التصادم إذا عرفنا الحركة قبل التصادم. رأينا في (البند 7-2)أنّه في تصادم جسمين مثل كرتي البليارد، فإنّ الزخم الكلّيّ يكون محفوظًا. وإذا كان الجسمان صلبين جدًّا، وليس هناك تولّد للحرارة أو شكلٌ من أشكال الطاقة في التصادم، فإنّ الطاقة الحركيّة بعد التصادم تساوي تلك قبل التصادم. وخلال الفترة الوجيزة التي يتلامس فيها الجسمان، فإنّ بعض (أو كلّ) الطاقة تُخزن لحظيًّا بصورة طاقة مرونة. ولكن إذا قارنا الطاقة الحركية الكلية بعد التصادم بالطاقة الحركية الكلية قبل التصادم، فإنّنا نجدهما متساويتين. يعرف مثل هذا التصادم الذي تكون فيه الطاقة الحركية الكلية محفوظة، بالتصادم المرن. إذا استعملنا A و B على أنهما رمزان سفليان لتمثلا جسمين، فيمكننا كتابة معادلة حفظ الطاقة الحركية الكلية بصورة

الطاقة الحركية KE الكلية قبل التصادم = الطاقة الحركية KE الكلية بعد التصادم.

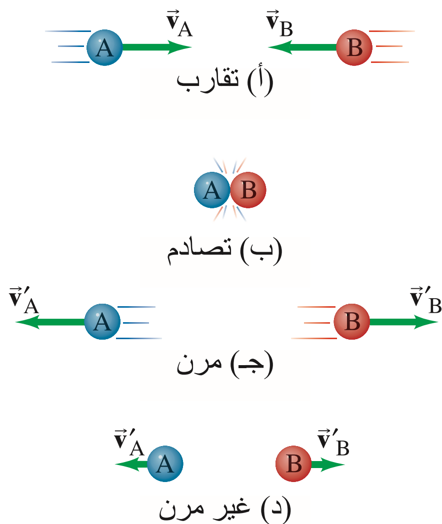
$$\tfrac{1}{2}m_A v_A^2 + \tfrac{1}{2}m_B v_B^2 = \tfrac{1}{2}m_A v_A'^2 + \tfrac{1}{2}m_B v_B'^2. \quad \text{[تصادم مرن]} \quad \mathbf{(7\text{-}6)}$$

هنا الكميات بفتحة (') تعني بعد التصادم، ومن غير فتحة تعني قبل التصادم، مثل (المعادلة 7-3)لقانون حفظ الزخم.

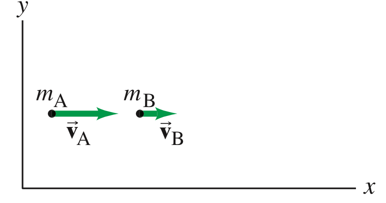
وعلى المستوى الذري، تكون التصادمات بين الجزيئات والذرات مرنة. وفي عالم الأجسام العادية [الجاهرية] يكون التصادم المرن مثاليًا، ولا نصل إليه أبدًا؛ لأنّ قليلًا من الطاقة الحرارية (ويحتمل طاقة صوتية وأشكال أخرى من الطاقة) تنتج دائمًا خلال التصادم. إلا أن تصادم كرتين قاسيتين، مثل كرات البليارد، يكون قريبا من تصادم تام المرونة، وعادة ما نعامله على هذا الأساس.

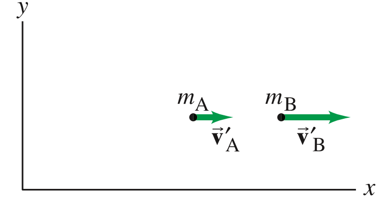
ونحتاج دائمًا إلى أن تتذكّر أنّ الطاقة الكلية دائمًا محفوظة حتى لو لم تكن الطاقة الحركية محفوظة.
التصادمات التي لا تكون الطاقة الحركية فيها محفوظة تُسمّى تصادمات غير مرنة. وتتحول الطاقة الحركية المفقودة إلى أشكال أخرى من الطاقة، عادةً طاقة حرارية، بحيث إن الطاقة الكلية (دائمًا) تكون محفوظة. في هذه الحالة $KE_A + KE_B = KE'_A + KE'_B +$ طاقة حرارية وأنواع أخرى من الطاقة
انظر (الشكل 7-13) وتفاصيل وصفه.

الشكل 7-13 جسمان متماثلا الكتلة (أ) يقتربان بسرعتين متساويتين (ب) يصطدمان، ومن ثَمَّ (ج) يرتدان بسرعتين متساويتين ولكن باتجاهين متعاكسين إذا كان التصادم مرنا أو (د) يرتدان بسرعات أقل بكثير أو حتى يسكنان إذا كان التصادم غير مرن.



7-5 التصادمات المرنة في بُعد واحد





الشكل 7-14 جسمان صغيران كتلتاهما m_A و m_B (أ) قبل التصادم و (ب) بعد التصادم.

نطبّق الآن قوانين حفظ الزخم والطاقة الحركيّة على تصادمٍ مرنٍ بين جسمين صغيرين يتصادمان بصورةٍ مباشرة، ومن ثَمّ تكون الحركة كلّها في خطٍّ مستقيم. دعنا نفرض أنّ الجسمين يتحركان بسرعتين v_A و v_B باتّجاه محور x قبل التصادم، (الشكل 7-14ب) . وبعد التصادم أصبحت سرعتهما v'_A و v'_B لكلّ سرعة $v > 0$ يتحرك الجسم نحو اليمين (تزايد x) أما لـ $v < 0$، فإنّ الجسم يتحرك نحو اليسار (باتّجاه تناقص قيم x).

من قانون حفظ الزخم،

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B$$

ولأنّ التصادم مرن، فإن الطاقة الحركية كذلك محفوظة:

$$\tfrac{1}{2} m_A v_A^2 + \tfrac{1}{2} m_B v_B^2 = \tfrac{1}{2} m_A v_A'^2 + \tfrac{1}{2} m_B v_B'^2$$

لدينا معادلتان يمكننا حلّهما لحساب مجهولين. إذا عرفنا الكتلتين وسرعتي الجسمين قبل التصادم، فنستطيع عندها حساب سرعتي الجسمين بعد التصادم، . ويمكننا اشتقاق نتيجةٍ مفيدةٍ بكتابة معادلة الزخم بالصورة

$$m_A(v_A - v'_A) = m_B(v'_B - v_B) \quad \textbf{(i)}$$

ويفيد كتابة معادلة الطاقة الحركيّة كما يلي:

$$m_A(v_A^2 - v_A'^2) = m_B(v_B'^2 - v_B^2) \quad \textbf{(ii)}$$

نلاحظ جبريًّا $(a - b)(a + b) = a^2 - b^2$

لذلك نكتب المعادلة الأخيرة كالتالي:

$$m_A(v_A - v'_A)(v_A + v'_A) = m_B(v'_B - v_B)(v'_B + v_B)$$

نقسم معادلة (ii) على معادلة (i) (نفرض أن $v_A \neq v'_A$ و $v'_B \neq v_B$) نحصل على

$$v_A + v'_A = v'_B + v_B$$

ونعيد كتابة هذه المعادلة

$$v_A - v_B = v'_B - v'_A$$

أو

$$v_A - v_B = -(v'_A - v'_B) \qquad \text{[تصادم مباشر مرن]} \qquad \textbf{(7-7)}$$

سرعات نسبية (في بُعد واحد فقط)

هذه نتيجة مهمّة: تخبرنا أنّه لأيّ تصادم مباشر مرن، السرعة النسبية للجسمين بعد التصادم لها مقدار (لكن في الاتّجاه المعاكس) السرعة النسبيّة نفسها للجسمين قبل التصادم بغضّ النظر عن قيمتي الكتلتين.

(المعادلة 7-7) اشتقت من قانون حفظ الطاقة الحركيّة لتصادم مرن، ويمكن استخدامها بدلًا منه. ولأنّ السرعتين غير مربعتين في (المعادلة 7-7) ، فإنّ استعمالها أسهل في الحسابات أكثر من تلك المتعلقة بحفظ الطاقة الحركية (المعادلة 7-6).

المثال 7-7 البلياردو

تتحرك كرة بلياردو A كتلتها m بسرعة v لتصدم مباشرةً بكرة B التي لها الكتلة نفسها لكنّها ساكنة $(v_B = 0)$. ماذا ستكون سرعتا الكرتين بعد التصادم على افتراض أنّ التصادم مرن؟

النهج: هناك مجهولان v'_B, v'_A. لذلك، فنحن بحاجةٍ إلى معادلتين مستقلتين. يركز اهتمامنا على الفترة الزمنية منذ قُبيل التصادم إلى بُعيد التصادم. وليس هناك أيّ قوّى خارجيّة تؤثّر في نظامنا المكوّن من جسمين (ورد الفعل العمودي قوتين متعادلتين) لذلك يكون الزخم محفوظًا. ينطبق كذلك حفظ الطاقة الحركية باعتبار أن التصادم مرن

الحــل: أعطينا أن $v_A = v$ و $v_B = 0$، وأن $m_A = m_B = m$، وبعدها، فإن حفظ الزخم يعطي

$$mv = mv'_A + mv'_B$$

ولأنّ الكتل تختصر

$$v = v'_A + v'_B$$

لدينا مجهولان (v'_A, v'_B) لذا، نحتاج إلى معادلةٍ ثانية قد تكون معادلة حفظ الطاقة الحركيّة. أو (المعادلة 7-7) الأسهل حيث اشتققنا منها:

$v_A - v_B = v'_B - v'_A$ أو $v = v'_B - v'_A$ لأن $v_A = v$ و $v_B = 0$.

نطرح $v = v'_B - v'_A$ من معادلتنا للزخم $(v = v'_A + v'_B)$

للحصول على $0 = 2v'_A$

وبالتالي، $v'_A = 0$. يمكننا الآن الحل لإيجاد المجهول الآخر (v'_B) لأن $v = v'_B - v'_A$

$$v'_B = v + v'_A = v + 0 = v$$

لنجمل ذلك، قبل التصادم لدينا

$$v_A = v, \qquad v_B = 0$$

وبعد التصادم

$$v'_A = 0, \qquad v'_B = v.$$

أي أنّ الكرة A وصلت إلى السكون بسبب التصادم، أمّا الكرة B فاكتسبت السرعة الأصليّة للكرة A. انظر (الشكل 7-15).

ملحوظة: نتيجتنا تلاحظ عادةً من قبل لاعبي البلياردو، وتنطبق فقط إذا كان للكرتين كتلتان متساويتان (وأن لا تُعطى الكرتان حركة مغزلية).



الشكل 7-15 في هذه الصورة متعددة الوميض لتصادم مباشر بين كرتين لهما كتلتان متساويتان. كرة البدء البيضاء تتسارع من السكون بواسطة عصا البدء لتصدم الكرة الحمراء الساكنة أصلًا. الكرة البيضاء تتوقّف في مسارها، والكرة الحمراء (المساوية في الكتلة) تبدأ في الحركة بسرعة الكرة البيضاء نفسها قبل التصادم. انظر (المثال 7-7).

المثال 7-8 تصادم نووي

بروتون (p) كتلته 1.01 u (وحدة كتلة ذريّة) يتحرّك بسرعة 3.60×10^4 m/s يصطدم مباشرةً بنواة ذرّة هيليوم (He) $(m_{He} = 4.00$ u$)$ ساكنة. ما سرعة البروتون ونواة الهيليوم بعد التصادم؟ (كما ذكرنا في الفصل الأول، 1 u $= 1.66 \times 10^{-27}$ kg، لكنّنا لا نحتاج إلى هذه الحقيقة). افرض أنّ التصادم حصل في حيّز من الفراغ.

النهج: كما في المثال 7-7، فهذا تصادم مباشر مرن، ولكن الآن كتلتي الجسيمين ليستا متساويتين. القوّة الخارجية الوحيدة هي جاذبيّة الأرض، إلّا أنّها ليست مهمّة بالمقارنة مع القوى الشديدة المتبادلة في التصادم. لذا نستخدم مجددًا قانوني حفظ الزخم والطاقة الحركيّة، ونطبقهما على نظامنا المكوّن من جُسيْمين.

الحل: دع البروتون (p) هو الجسيم A ونواة الهيليوم (He) هي الجسيم B. عندنا $v_B = v_{He} = 0$ و $v_A = v_p = 3.60 \times 10^4$ m/s نريد إيجاد السرعتين v'_p و v'_{He} بعد التصادم. من قانون حفظ الزخم

$$m_p v_p + 0 = m_p v'_p + m_{He} v'_{He}$$

ولأنّ التصادم مرن، فالطاقة الحركيّة لنظامنا المكوّن من جُسيمَينْ محفوظة. ويمكننا استعمال (المعادلة 7-7)، لتصبح

$$v_p - 0 = v'_{He} - v'_p$$

وهكذا

$$v'_p = v'_{He} - v_p$$

وبتعويض ذلك في معادلة الزخم السابقة، نحصل على

$$m_p v_p = m_p v'_{He} - m_p v_p + m_{He} v'_{He}$$

ونحل لإيجاد v'_{He}، فنحصل على

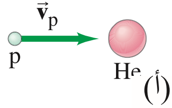
$$v'_{He} = \frac{2m_p v_p}{m_p + m_{He}} = \frac{2(1.01\text{ u})(3.60 \times 10^4\text{ m/s})}{5.01\text{ u}} = 1.45 \times 10^4\text{ m/s}.$$

المجهول الثاني هو v'_p، الذي نحصل عليه من

$$v'_p = v'_{He} - v_p = (1.45 \times 10^4\text{ m/s}) - (3.60 \times 10^4\text{ m/s}) = -2.15 \times 10^4\text{ m/s}.$$

الإشارة السالبة لـ v'_p تدلّنا على أنّ البروتون يعكس اتجاهه بسبب التصادم، ونرى أن سرعته أقل من سرعته الأصلية (انظر الشكل 7-16).

ملحوظة: هذه النتيجة معقولة: يتوقع من البروتون الخفيف أن يرتدَّ إلى الخلف من نواة الهيليوم ذات الكتلة الأكبر، ولكن ليس بسرعته الأصليّة، كما في حالة الارتداد عن جدارٍ صلب (يناظر كتلة هائلة).





الشكل 7-16 المثال (7-8): (أ) قبل التصادم، (ب) بعد التصادم

6-7 التصادمات غير المرنة

تُسمّى التصادماتُ التي تكون فيها الطاقةُ الحركيّةُ غيرَ محفوظةٍ التصادماتِ غير المرنة. يتحول بعض الطاقة الحركيّة الابتدائيّة إلى أنواعٍ أخرى من الطاقة مثل الطاقة الحراريّة أو طاقة الوضع، لذلك تكون الطاقة الحركيّة الكليّة بعد التصادم أقلَّ من الطاقة الحركيّة الكليّة قبل التصادم. وقد يحدث العكس عندما تنطلق طاقة وضع (مثل الطاقة الكيماويّة أو النوويّة)، عندما تكون الطاقة الحركيّة الكليّة بعد التصادم أكبر من الطاقة الحركيّة الكليّة قبل التصادم. الانفجارات هي أمثلة على ذلك.

تصادم عديم المرونة (تام اللامرونة)

التصادمات الجاهريّة عادةً ما تكون غير مرنة، على الأقل إلى حدٍ ما، وغالبًا إلى حدٍّ بعيد. إذا التصق جسمان نتيجة التصادم، يُقال عندها إنّ التصادم **عديم المرونة**. ومثال على هذا النوع من التصادم: كرتان متصادمتان من الطين التصقتا معًا، أو عربتا قطار التصقتا عند اصطدامهما. أحيانًا تتحوّل الطاقة الحركيّة كلّها إلى أنواعٍ أخرى من الطاقة في التصادم غير المرن، ولكن أحيانًا أخرى، بعضٌ من هذه الطاقة هو الذي يتحول فقط. في (المثال 7-3) ، رأينا أنه عندما اصطدمت عربة القطار المتحركة بأخرى متوقفة، انطلقتا بعد التصادم ببعض الطاقة في تصادمٍ عديم المرونة، حيث تحوّل الجزء الأقصى من الطاقة الحركيّة إلى أنواعٍ أخرى من الطاقة منسجمًا مع قانون حفظ الزخم. وبالرغم من أنّ الطاقة الحركيّة غير محفوظة في التصادمات غير المرنة، فإنّ الطاقة بصورتها العامّة لا تزال محفوظةً بالإضافة إلى حفظ الزخم الخطّي الاتجاهي.

المثال 7-9 عربات القطار مرة أخرى

التصادم عديم المرونة بين عربتي قطار الذي درسناه في (المثال7-3). احسب مقدار الطاقة الحركيّة الابتدائيّة الذي تحوّل إلى طاقةٍ حراريّة أو أنواعٍ أخرى من الطاقة.

النهج: التحمت عربتا القطار ببعضهما بعد التصادم. لذلك، فهذا تصادم عديم المرونة. (تام اللامرونة). بطرح الطاقة الحركيّة الكليّة بعد التصادم من الطاقة الحركيّة الأصليّة، يمكننا إيجاد مقدار الطاقة التي تحوّلت إلى أنواع أخرى من الطاقة.

الحل: قبل التصادم، كانت العربة A هي المتحركة فقط. لذا، فإنّ الطاقة الحركيّة الابتدائيّة هي:

$$\tfrac{1}{2}m_A v_A^2 = \tfrac{1}{2}(10{,}000\ \text{kg})(24.0\ \text{m/s})^2 = 2.88 \times 10^6\ \text{J}$$

وبعد التصادم، تتحرك العربتان بسرعة 12.0 m/s، من قانون حفظ الزخم

$$\tfrac{1}{2}(20{,}000\ \text{kg})(12.0\ \text{m/s})^2 = 1.44 \times 10^6\ \text{J}$$

(المثال 7 - 3)، لذلك تكون الطاقة الحركيّة الكليّة بعد التصادم أي أنّ الطاقة المتحوّلة إلى أنواعٍ أخرى تساوي

$$(2.88 \times 10^6\ \text{J}) - (1.44 \times 10^6\ \text{J}) = 1.44 \times 10^6\ \text{J}$$

وهي تساوي نصف الطاقة الأصليّة.

البندول القذفي (البالستي)

المثال 7-10 البندول القذفي (البالستي)

البندول القذفي هو أداة تُستعمل عادةً لقياس سرعة مقذوفٍ مثل الطلقة. يُطلق المقذوف (كتلته m) باتجاه قطعةٍ كبيرةٍ من الخشب أو مادةٍ أخرى كتلتها M، وتكون معلّقة مثل البندول. (عادة تكون M أكبر على نحو ملحوظ من m) ونتيجة للتصادم، يتأرجح البندول والمقذوف معًا إلى أقصى ارتفاع h (الشكل 7-17). جد العلاقة بين السرعة الأفقية الابتدائية للمقذوف، v وأقصى ارتفاع h.

النهج: يمكننا تحليل العملية بتقسيمها إلى جزأين أو فترتين زمنيتين هما: (1) الفترة من قُبيل التصادم إلى بُعيد التصادم نفسه. (2) الفترة التالية، التي يتحرّك فيها البندول من الوضع الرأسي إلى أقصى ارتفاع h. في الجزء (1)، (الشكل 7-17أ)، نفرض أن زمن التصادم ضئيل جدًّا بحيث يصل المقذوف إلى السكون داخل قطعة الخشب قبل أن تتحرك هذه الأخيرة بصورةٍ كبيرةٍ من مكانها مباشرة تحت الحامل. في الواقع، لاتوجد هناك قوّةٌ محصّلة خارجيّة، ونستطيع بذلك تطبيق قانون حفظ الزخم لهذا التصادم عديم المرونة. وفي الجزء (2)، (الشكل 7-17ب)، يبدأ البندول بالحركة تحت تأثير قوّة خارجيّة محصّلة (الجاذبية، التي تعيده إلى مكانه العمودي). وفي الجزء (2) لا نستطيع تطبيق قانون حفظ الزخم. ولكن يمكن تطبيق قانون حفظ الطاقة الميكانيكية لأنّ الجاذبيّة قوّة محافظة (الفصل 6). تتحوّل الطاقة الحركيّة حالاً بعد التصادم بصورةٍ كاملةٍ إلى طاقة وضعٍ جاذبيّة عندما يصل البندول إلى أقصى ارتفاعه h.

الحــل: في الجزء (1) الزخم الخطي محفوظ:

الزخم الكلّي p بعد التصادم = الزخم الكلّي p قبل التصادم.

$$mv = (m + M)v' \qquad \text{(i)}$$

حيث v' سرعة قطعة الخشب والمقذوف المغروس بُعيد التصادم، قبل أن يتحركا بصورة ملموسة. الطاقة الميكانيكيّة في الجزء (2) محفوظة. ونختار $y = 0$ عندما يعلّق البندول رأسيًّا، ثم $y = h$ عندما يصل نظام (البندول – المقذوف) إلى أقصى ارتفاعه. ونكتب عندها:

$$(\mathrm{KE + PE}) \text{ عند أقصى ارتفاع للبندول } = (\mathrm{KE + PE}) \text{ بعيد التصادم .}$$

أو

$$\tfrac{1}{2}(m + M)v'^2 \ + \ 0 = 0 \ + \ (m + M)gh. \qquad \text{(i)}$$

ونحل لإيجاد v':

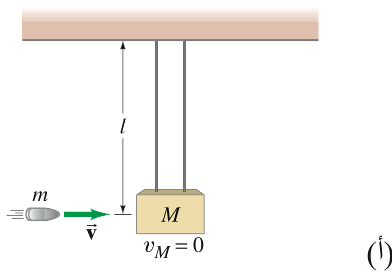
$$v' = \sqrt{2gh}$$

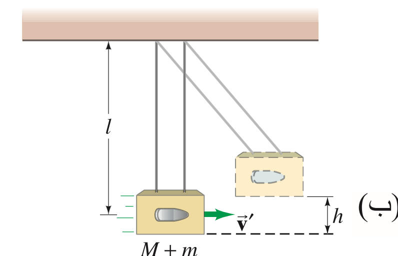
ندخل هذه النتيجة في معادلة (i) ونحل لإيجاد v:

$$v = \frac{m + M}{m}v' = \frac{m + M}{m}\sqrt{2gh}$$

ملحوظة: كان فصل الحل إلى جزأين حاسمًا. إن هذا التحليل عبارة عن طريقة فاعلة لحل المسائل. ولكن كيف تقرر أن تعمل مثل هذا الفصل؟ فكّر في قوانين الحفظ، إنّها أدواتك. ابدأ بسؤال نفسك هل تنطبق هذه القوانين تحت هذه الظروف أم لا. هنا، حددنا أن الزخم سيكون محفوظاً فقط خلال التصادم القصير، وهو ما دعوناه الجزء (1) الذي بسبب أنّ التصادم عديم المرونة فيه، فإن قانون حفظ الطاقة الميكانيكية لا ينطبق. أما في الجزء (2) فإن قانون حفظ الطاقة الميكانيكية يكون ساري المفعول، ولكن ليس الزخم.

لاحظ، على أي حال، لو كانت هناك حركة ملموسة للبندول في أثناء تباطؤ المقذوف في قطعة الخشب، وعندها ستكون هناك قوّةٌ خارجيّة (الجاذبية) في أثناء التصادم، فسيكون من المتعذر تطبيق قانون حفظ الزخم في الجزء (1).





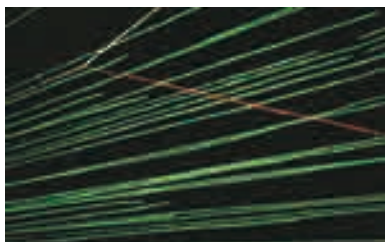
الشكل 7-17 البندول القذفي (المثال 7-10)

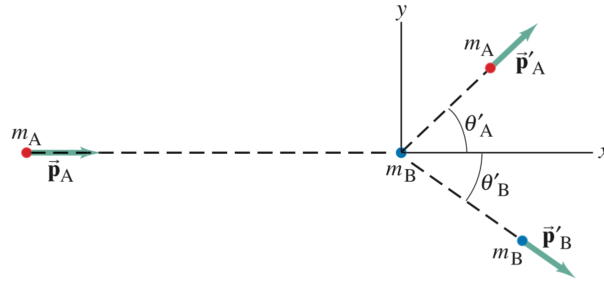
توجيه لحلّ الأسئلة. استعمل قوانين الحفظ لتحليل المسألة.

* 7-7 التصادمات في بعدين أو ثلاثة أبعاد

يمكن كذلك تطبيق قوانين حفظ الزخم والطاقة في التصادمات ذات البعدين أو الثلاثة أبعاد؛ حيث تكون الطبيعة الاتجاهية للتصادم مهمّة بصورةٍ خاصّة. أحد الأنواع الشائعة للتصادم غير المباشر هو الذي يصدم فيه جسم (يدعى المقذوف) جسمًا آخرَ يكون ساكنًا في البداية (يُسمى الهدف). هذا هو الوضع العام في ألعاب مثل البلياردو، وفي التجارب الذريّة والنوويّة (المقذوفات من انحلالٍ اشعاعي، أو مسارعٍ عالي الطاقة، بصدم النواة الهدف: الشكل 7-18).

الشكل 7-18 في صورة حديثة ملونة في غرفة غيمية صنعت في بداية (1920s) الفيزياء النووية. الخطوط الخضراء هي مسارات أنوية هيليوم (He) قادمة من اليسار. إحدى (He) مبينة باللون الأصفر تصدم بروتونا من غاز الهيدروجين في الغرفة ويتشتت كلاهما بزاوية، مسار البروتون المتشتت مبين باللون الأحمر.





الشكل 7-19 الجسم A، المقذوف، يصطدم بالجسم B، الهدف بعد التصادم يتحركان بزخم $\vec{p}'_A, \vec{p}'_B$ وبزاويتين θ'_B ، θ'_A.

(الشكل 7 - 19)يوضّح المقذوف القادم m_A بمتجه على امتداد محور x نحو الهدف m_B الذي يكون ساكنًا في البداية. فيما لو كانت كرتا بلياردو تصدمان m_A الكتلة m_B وتذهبان بعيدًا بزاويتين θ'_B ، θ'_A، تُقاسان نسبةً لاتجاه m_A الأصلي (محور x)*.

دعنا نطبّق قانون حفظ الزخم على تصادمٍ مثل ذلك المبيّن في (الشكل 7-19). نختار مستوى xy ليكون المستوى الذي يقع فيه الزخمان الابتدائي والنهائي. الزخم كميّة متجهة، ولأنّ الزخم الكلّي محفوظ، فإنّ كلًّا من مركبتيه في اتجاهي x و y محفوظتان أيضًا.

حفظ المركبة x للزخم يعطينا

$$p_{Ax} + p_{Bx} = p'_{Ax} + p'_{Bx}$$

ومع

$$p_{Bx} = m_B v_{Bx} = 0$$

P_x المحفوظة

$$m_A v_A = m_A v'_A \cos\theta'_A + m_B v'_B \cos\theta'_B \qquad \text{(7-8أ)}$$

حيث تعود الفتحة (') إلى الكميّات بعد التصادم. لأنّه لم يكن هناك حركةٌ باتجاه y قبل التصادم؛ فمركبة الزخم باتجاه y تساوي صفرًا قبل التصادم. ولذلك فإنّ مركبة الزخم باتجاه y بعد التصادم هي:

$$p_{Ay} + p_{By} = p'_{Ay} + p'_{By}$$

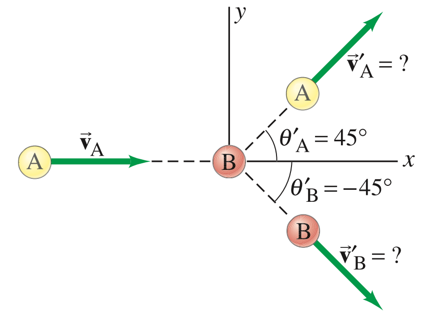
أو

P_y المحفوظة

$$0 = m_A v'_A \sin\theta'_A + m_B v'_B \sin\theta'_B . \qquad \text{(7-8ب)}$$

المثال 7-11 تصادم كرتي بلياردو في بعدين

كرة البلياردو A تتحرّك بسرعة $v_A = 3.0\ \text{m/s}$ باتجاه $+x$ (الشكل 7-20) تصدم كرةً تساويها بالكتلة B ساكنة. شُوهدت الكرتان تتحرّك كلٌّ منهما بزاوية $45°$ مع محور x، الكرة A فوق محور x، والكرة B تحته. أي أنّ $\theta'_A = 45°$ و $\theta'_B = -45°$ في (الشكل 7-20). ما قيمة سرعتي الكرتين بعد التصادم؟



الشكل 7-20 المثال 7-11

النهج: لا توجد قوّةٌ محصّلة خارجيّة على نظامنا ذي الكرتين، نفترض أن الطاولة أفقيّة (القوة العمودية توازن قوة الجاذبية). وهكذا ينطبق قانون حفظ الزخم، ونطبقه على المركبتين x و y مستخدمين مستوى xy المبين في (الشكل 7-20). ونحصل على معادلتين، كما أنّ لدينا مجهولين، هما: v'_B، v'_A. ومن التماثل يمكننا تخمين أنّ السرعتين متساويتان. لكن دعنا لا نفرض ذلك الآن. ورغم أنّنا لا نعلم فيما إذا كان التصادم مرنًا أم لا، فإنّنا نستطيع تطبيق قانون حفظ الزخم.

الحل: نطبّق قانون حفظ الزخم، (المعادلة 7-8أ، ب)، ونحل لإيجاد v'_B، v'_A، ونعلم انّ $m_A = m_B (= m)$، وهكذا.

$$mv_A = mv'_A \cos(45°) + mv'_B \cos(-45°) \qquad (\text{مركبة } x)$$

و

$$0 = mv'_A \sin(45°) + mv'_B \sin(-45°) \qquad (\text{مركبة } y)$$

نختصر الكتلتين m في المعادلتين (الكتلتان متساويتان).

* قد يبدأ الجسمان بالانحراف حتى قبل أن يتلامسا، لذا أثّرت بينهما قوًى كهربائيّة أو مغناطيسيّة أو نووية. يمكنك أن تفكّر, مثلًا في مغناطيسين موضوعين بحيث يتنافرا: عندما يتحرّك أحدهما نحو الأخر, فإنّ الثاني يتحرّك بعيدًا قبل أن يلامسه الأول.

نحصل من المعادلة الثانية على [تذكر أن $\sin(-\theta) = -\sin\theta$]:

$$v'_B = -v'_A \frac{\sin(45°)}{\sin(-45°)} = -v'_A \left(\frac{\sin 45°}{-\sin 45°}\right) = v'_A$$

وهكذا، فإنّ سرعتيهما متساويتان كما توقعنا في البداية. تعطي المعادلة الأولى [$\cos(-\theta) = \cos\theta$]

$$v_A = v'_A \cos(45°) + v'_B \cos(45°) = 2v'_A \cos(45°)$$

أو

$$v'_A = v'_B = \frac{v_A}{2\cos(45°)} = \frac{3.0 \text{ m/s}}{2(0.707)} = 2.1 \text{ m/s}$$

ملحوظة: عندما يكون لدينا معادلتان مستقلتان، فإنّنا نستطيع حلّهما لتحديد مجهولين على الأكثر.

التمرين و: اعمل حسابًا لترى فيما إذا كانت الطاقة الحركيّة محفوظةً للتصادم في (المثال 7-11).

إذا كنّا نعرف أنّ التصادم مرن، فيمكننا كذلك تطبيق حفظ الطاقة الحركيّة، ومن ثَمّ الحصول على معادلةٍ ثالثةٍ بالإضافة إلى (المعادلتين 7-8أ و ب):

$$KE_A + KE_B = KE'_A + KE'_B$$

أو للتصادم المبيّن في (الشكل 7-20):

KE المحفوظة

$$\tfrac{1}{2}m_A v_A^2 = \tfrac{1}{2}m_A v'^2_A + \tfrac{1}{2}m_B v'^2_B. \quad \text{[تصادم مرن]} \quad \textbf{(7-8جـ)}$$

إذا كان التصادم مرنًا، فسيكون عندنا ثلاث معادلات مستقلّة، ونستطيع حلّها لحساب ثلاثة مجاهيل. فإذا عرفنا (v_A, m_B, m_A و v_B إذا لم تكن صفرًا)، فلا نستطيع تحديد المتغيّرات الأخيرة $v'_A, v'_B, \theta'_A, \theta'_B$ لأنّ هناك أربعةً منها. على أيّ حال، إذا قسنا أحد هذه المجاهيل، مثلا θ'_A، فنستطيع عندها أن نحدّد الثلاثة الأخرى (v'_A, v'_B, θ'_B)، ويمكننا تحديدها باستعمال (المعادلات 7-8أ، ب، ج).

ملحوظة: المعادلة 7-7 لا تنطبق على التصادمات في بعدين، وتعمل فقط إذا حصل التصادم على خط واحد.

تنويه:
(المعادلة 7-7) تعمل فقط في بعد واحد.

طريقة حل المسائل	حفظ الزخم والتصادمات

1. اختر **نظامك**. إذا كان الوضع معقّدًا، ففكّر كيف يمكنك تقسيمه إلى أجزاء بحيث ينطبق واحد أو أكثر من قوانين الحفظ.

2. إذا كانت هناك **قوة خارجية محصلة** على نظامك، فتأكّد عندها أن الفترة الزمنية قصيرةٌ لدرجة أنّ التأثير في الزخم مهمل؛ القوى المتبادلة بين الأجسام المتفاعلة، تكون هي المهمة إذا أريد تطبيق حفظ الزخم.[ملحوظة، إذا انطبق ذلك على جزء من المسألة،فإنّنا نطبّق قانون حفظ الزخم على ذلك الجزء] .

3. ارسم **شكلا** للوضع الأول، قبل أن يحدث التفاعل (التصادم والانفجار)، ويمثل الزخم لكل جسم بسهم وعلامة. اعمل الشيء نفسه للوضع النهائي، بُعيد التفاعل.

4. اختر **مجموعة محاور** و "+" و "−" للاتجاهات. (للتصادم المباشر) سوف تحتاج إلى (محور x). حيث عادة اختيار $+x$ باتجاه سرعة الجسم الابتدائية.

5. **طبق معادلات حفظ الزخم:**
الزخم الابتدائي الكلّي = الزخم النهائي الكلّي
سيكون لديك معادلة لكل مركبة (x, y, z)ولكن هناك معادلة واحدة فقط للتصادم المباشر.[لا تنس أن الزخم الكلّي للنظام قد تم حفظه، وليس الزخم للأجسام متفرقة].

6. إذا كان التصادم مرنًا، فيمكنكعندها **كتابة معادلة حفظ الطاقة الحركية:** يحدث (التصادم، الانفجار) ومثّل
KE الكلية الابتدائية = KE الكلية النهائية
[أحيانًا، يمكنك استعمال (المعادلة 7-7):
$$v_A - v_B = v'_B - v'_A$$
إذا كان التصادم في بُعد واحد (أي مباشر)].

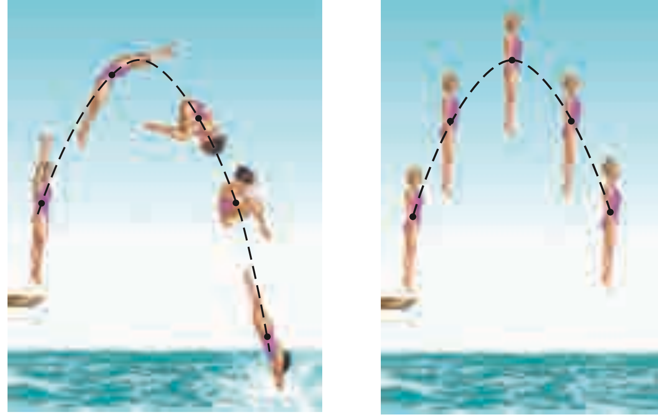
7. حل لإيجاد **المجاهيل**.

8. **اختبر** عملك، واختبر الوحدات،ثمّ اسأل نفسك: هل النتائج معقولة؟

8-7 مركز الكتلة (CM)

يُعدّ الزخم مبدأً قويًّا ليس فقط في تحليل التصادمات، بل وكذلك في تحليل الحركة الانتقاليّة للأجسام الكبيرة. حتى الآن، كلّما تعاملنا مع حركة جسم ممتد (أي الجسم الذي له أبعاد)، افترضنا أنه يمكن تقريبه كجسمٍ نقطي، أو أن حركته انتقالية فقط.

لكن الأجسام الحقيقيّة تستطيع أن تقوم بحركاتٍ دورانية وغيرها أيضًا. فمثلًا الغواص (الشكل 7-21أ) يقوم بحركةٍ انتقاليّة فقط (كل أجزاء الجسم تتبع المسار نفسه)، فيما يقوم الغواص (الشكل 7-21ب) بحركتين: انتقاليّة ودورانيّة. وسوف نشير إلى الحركة غير الانتقالية البحتة. بالحركة العامة.



الشكل 7-21 حركة الغواص هي انتقالية بحتة في (أ) لكنها انتقالية ودورانية. في (ب). البقعة السوداء تمثل مركز الكتلة CM للغواص عند أي لحظة.

تشير المشاهدات إلى أنّه حتى لو دار الجسم، أو عدّة أجزاءٍ من نظامٍ من الأجسام تتحرّك نسبةً إلى بعضها، فهناك نقطةٌ واحدةٌ تسير بالمسار نفسه الذي سوف يسلكه جُسيم يخضع للقوة المحصلة نفسها. تُسمّى هذه النقطة **بمركز الكتلة** (تختصر CM). الحركة العامة لجسم ممتد (لا نقطي) (أو نظام من الأجسام) يمكن اعتبارها مجموع الحركة الانتقالية لمركز الكتلة (CM) بالإضافة إلى الحركتين الدورانية والاهتزازية أو أيّ نوع آخر حول مركز الكتلة (CM).

مركز الكتلة
الحركة العامة

كمثال، افترض حركة مركز الكتلة للغواص (الشكل 7-21) ، CM يتبع مسارًا بشكل قطعٍ مكافئ حتى لو دار الغواص (الشكل 7-21ب). هذا القطع المكافئ يشبه مسار المقذوف عندما يخضع لقوة الجاذبية فقط (أي حركة المقذوفات). ونقاط أخرى في جسم الغواص مثل الأقدام أو الرأس تتبع مسارات أكثر تعقيدًا.

(الشكل 7-22) يبين مفتاح براغي محصّلة القوى عليه تساوي صفرًا، يدور أثناء انتقاله على سطحٍ أفقي. لاحظ أنّ مركز كتلته الذي يحمل علامة صليب أحمر، يتحرّك في خط مستقيم، كما يبين الخط الأبيض المتقطع.



الشكل 7-22 انتقال مفتاح يتحرك على سطح أفقي ودورانه. مركز الكتلة يحمل علامة صليب ويتحرك في خط مستقيم.

سوف نرى في (البند 7-10) أنّ الخصائص المهمة لمركز الكتلة تنبثق من قوانين نيوتن. إذا تم تعريف مركز الكتلة بالطريقة التالية، فيمكننا عدّ أي جسم لا نقطي على أنّه مكوّن من عددٍ كبيرٍ من الجسيمات الدقيقة. نأخذ أولًا نظامًا مكوّنًا من جسمين فقط (أو جسمين صغيرين)، كتلتيهما m_A و m_B ونختار نظام محاور يقع فيه الجسمان على محور x عند مكانين هما: x_A و x_B (الشكل 7-23). يعرف مركز الكتلة ليقع عند الموقع x_{CM} الذي يعطى بـ

$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B}{m_A + m_B} = \frac{m_A x_A + m_B x_B}{M}$$

حيث $M = m_A + m_B$ هي الكتلة الكلية للنظام. يقع مركز الكتلة على الخط الذي يصل m_A و m_B. لو كانت الكتلتان متساويتين $(m_A = m_B = m)$ عندها يكون x_{CM} في منتصف الطريق بينهما؛ حيث في هذه الحالة، نحصل على

$$x_{CM} = \frac{m(x_A + x_B)}{2m} = \frac{(x_A + x_B)}{2}$$

الإحداثي x لمركز الكتلة (جسيمات متعددة).

إذا كانت إحدى الكتلتين أكبر من الأخرى، مثلا $m_A > m_B$، يكون مركز الكتلة أقرب إلى الكتلة الكبرى.

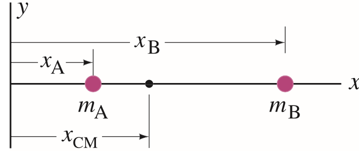
لو كانت الكتلة كلّها مركّزة عند x_B، لذلك $m_A = 0$، عندها $x_{CM} = (0x_A + m_B x_B)/(0 + m_B) = x_B$ كما نتوقع.

وإذا كان هناك أكثر من جسمين على نفس الخط فسيكون هناك حدود إضافية:

$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C + \cdots}{m_A + m_B + m_C + \cdots} = \frac{m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C + \cdots}{M} \qquad \text{(9-7أ)}$$

الإحداثي x لمركز الكتلة (جسيمات متعددة).

حيث M هي الكتلة الكلية للجسيمات جميعها.



الشكل 7-23 مركز الكتلة لنظام مكون من جسمين يقع على الخط الواصل بين الكتلتين هنا $m_A > m_B$ لذلك يكون مركز الكتلة أقرب إلى m_A من m_B.

مثال 7-12

ثلاثة أشخاص كتلهم متساوية تقريبًا (m) على قارب خفيف (مملوء بالهواء) يجلسون على امتداد محور x في المواقع $x_A = 1.0\,\text{m}, x_B = 5.0\,\text{m}, x_C = 6.0\,\text{m}$، وتقاس من نهاية القارب اليسرى، كما هو مبيّن في (الشكل 7 - 24). جد موقع CM. اهمل كتلة القارب.

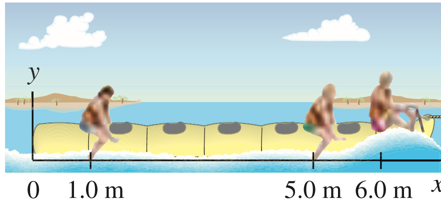
النهج: أعطيت لنا كتل الأشخاص الثلاثة ومواقعهم، لذا نستخدم ثلاثة حدود في (المعادلة 7-9أ). نفترض كلّ شخصٍ جُسيمًا نقطيًا. وهذا يعني أن موقع كلّ شخصٍ هو موقع مركز كتلته.

الحل: نستخدم (المعادلة 7-9أ) بثلاثة حدود:

$$x_{CM} = \frac{mx_A + mx_B + mx_C}{m + m + m} = \frac{m(x_A + x_B + x_C)}{3m}$$
$$= \frac{(1.0\,\text{m} + 5.0\,\text{m} + 6.0\,\text{m})}{3} = \frac{12.0\,\text{m}}{3} = 4.0\,\text{m}$$

يقع مركز الكتلة على بعد 4.0 m من نهاية القارب اليسرى.

ملحوظة: إحداثيات مركز الكتلة تعتمد على نظام الإحداثيات الذي تم اختياره، إلا أنّ الموقع الطبيعي لمركز الكتلة لا يعتمد على هذا الاختيار.



الشكل 7-24 (المثال 7-12).

التمرين ز: احسب موقع مركز الكتلة لثلاثة أشخاص في (المثال 7-12). بأخذ نقطة الأصل عند موقع السائق $(x_C = 0)$ على اليمين. هل الموقع الطبيعي لمركز الكتلة هو نفسه؟

إذا انتشرت الجسيمات في بعدين أو ثلاثة أبعاد، فيجب عندها تحديد ليس الإحداثي x_{CM} فحَسْبُ، بل الإحداثيين y و z كذلك، اللذين يكتبان بصيغتين مثل (المعادلة 7-9أ).

فمثلا الإحداثي y سيكون:

$$y_{CM} = \frac{m_A y_A + m_B y_B + \cdots}{m_A + m_B + \cdots} = \frac{m_A y_A + m_B y_B + \cdots}{M} \qquad \text{(9-7ب)}$$

الإحداثي y لمركز الكتلة.

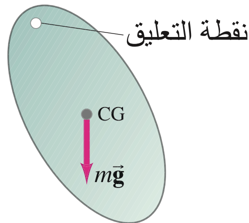
مركز الجاذبية

هناك مفهوم يشبه *مركز الكتلة*، و **هو مركز الجاذبية** (CG). مركز الجاذبية (CG) لجسم هو تلك النقطة التي يمكن اعتبارها نقطة تأثير قوّة الجاذبيّة. في الواقع، إنّ قوّة الجاذبيّة تؤثّر في كلّ أجزاء الجسم، ولكن لغرض تحديد الحركة الانتقالية للجسم على نحوٍ كامل، يمكننا افتراض أنّ الوزن الكلّي للجسم (وهو مجموع الأوزان لكلّ أجزائه) يؤثّر عند CG. هناك اختلاف بين مفهومي مركز الجاذبية ومركز الكتلة، ولكنّهما يُعتبران النقطة نفسها للأغراض العمليّة جميعها.*

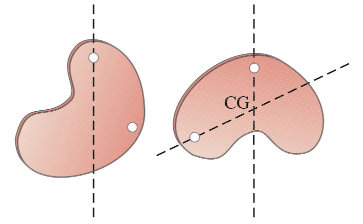
عادةً، يمكن تحديد مركز الكتلة أو مركز الجاذبيّة عمليًّا أسهل من تحديده تحليليًّا. إذا عُلّقَ الجسم من أيّ نقطةٍ فإنّه سوف يتأرجح (الشكل 7-25) حتى يتوقف بحيث يقع CG على خطٍّ عموديٍّ مباشرةً تحت نقطة التعليق. إذا كان الجسم ثنائيّ الأبعاد أو فيه مستوى تماثل، فيحتاج إلى أن يُعلق من نقطتين مختلفتين وترسم الخطوط العمودية (الشاقول).

عندها سيكون مركز الجاذبيّة عند تقاطع الخطّين كما في (الشكل 7-26) .

الشكل 7-25 قوة الجاذبية، التي تؤثر عند مركز الجاذبية، تؤدي إلى دوران الجسم حول نقطة التثبيت. لو كان مركز الجاذبية على خط عمودي مباشر تحت نقطة التثبيت، لبقي الجسم ساكنا.



* قد يكون هناك اختلاف بين CM و CG فقط إذا كان الجسم كبيرًا جدًّا، بحيث يختلف تسارع الجاذبية g باختلاف أجزاء الجسم.



الشكل 7-26 ايجاد CG

إذا لم يكن للجسم مستوى تماثل، يحدد CG بالنسبة إلى البعد الثالث بتعليق الجسم من - على الأقل- ثلاث نقاط خطوطها الشاقولية لا تقع في المستوى نفسه. وفي الأجسام ذات الشكل المتماثل مثل أسطوانات منتظمة (العجلات)، كرات ، أجسام صلبة مستطيلة، فإن المركز الكتلة CM يقع في المركز الهندسي للجسم.

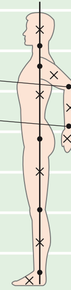
لبعض الأجسام، قد يقع CM في الواقع خارج الجسم. ومركز الكتلة لعجلةٍ - مثلا - يقع في منتصف التجويف.

* 9-7 CM لجسم الإنسان

إذا كانت لدينا مجموعة من الأجسام اللانقطية، مركز كتلة كلٍّ منها معروف، فيمكننا إيجاد مركز كتلة المجموعة باستعمال (المعادلات 7-9أ) . كمثال، نستعمل جسم الإنسان. (الجدول 7-1) يبين مركز الكتلة والمفاصل لأجزاء شخص "نموذج". طبعًا هناك اختلافاتٌ واسعةٌ بين الأشخاص، ولهذا تمثّل هذه البيانات متوسّطًا غاية في التقريب. والأرقام تمثّل نسبةً من الطول الكلّي الذي يُعدّ 100 وحدة، كذلك الكتلة الكلية 100 وحدة. فمثلًا، إذا كان شخصٌ طوله 1.70 m، فإنّ مفصل كتفه سيكون (1.70 m)(81.2/100) = 1.38 m) فوق أرض الغرفة.

الجدول 7-1 مركز الكتلة لأجزاءٍ من جسم إنسان نموذج

(الطول الكامل والكتلة الكاملة = 100 وحدة)

المسافة فوق الأرض للمفاصل (%)	موضع المفاصل (•)	مركز الكتلة (*) الارتفاع فوق الأرض%		نسبة الكتلة
91.2	قاعدة الهيكل العظمي	الرأس	93.5	6.9
81.2	مفصل الكتف	الجذع والرقبة	71.1	46.1
		أعلى الذراعين	71.1	6.6
62.2	كوع	أسفل الذراعين	55.3	4.2
46.2	رسغ	اليدان	43.1	1.7
52.1	مفصل الورك	الفخذ	42.5	21.5
		الساق	18.2	9.6
28.5	مفصل الركبة	القدم	1.8	3.4
4.0	مفصل الكاحل	مركز كتلة الجسم	58.0	100.0

المثال 7-13 مركز كتلة الرجل

حدّد مركز الكتلة للرجل كاملةً (أ) عندما تكون ممدودة.(ب) عندما تكون مثنيّةً بزاوية 90^o. انظر (الشكل 7-27) . افرض أنّ طول الشخص 1.70 m.

النهج: يتكوّن نظامنا من ثلاثة أشياء: الفخذ، والساق، والقدم. موقع مركز الكتلة لكلِّ جسم، وكذلك كتلته معطاةٌ في (الجدول 7-1) ، حيث يُعبَّر عنها بوحدات مئوية. للتعبير عن النتائج بالأمتار تضرب هذه الوحدات المئوية في (1.70 m/100). وعند مدّ الرجل، تكون المسألة في بعدٍ واحد، ويمكن أن نحلّ لإيجاد الإحداثي x لمركز الكتلة. وعند ثني الرجل، تصبح المسألة ثنائيّة الأبعاد، ونحتاج عندها إلى إيجاد كلٍّ من الإحداثيين x و y.

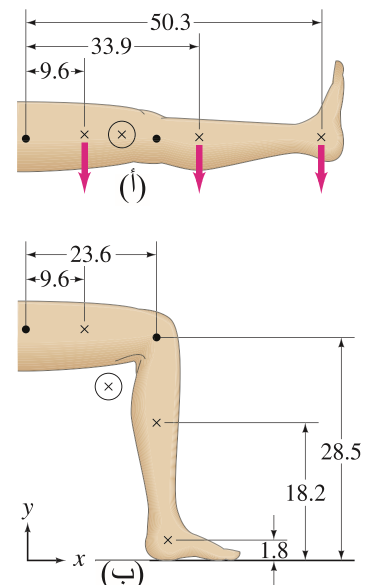
الحل: (أ) تحدد المسافات من مفصل الورك باستعمال (الجدول 7-1)، وتجد الأرقام (%) المبيّنة في (الشكل 7-27أ). باستعمال المعادلة 7-9أ، نجد

$$x_{CM} = \frac{(21.5)(9.6) + (9.6)(33.9) + (3.4)(50.3)}{21.5 + 9.6 + 3.4} = 20.4 \text{ وحدة}$$

وهكذا، فإنّ مركز كتلة الرجل والقدم هو 20.4 وحدة من مفصل الحوض أو 31.7 = 52.1-20.4 وحدة من قاعدة القدم. وبما أنّ طول الشخص 1.70 m، فإنّ ذلك يساوي = (1.70 m) (31.7/100) 0.54 m فوق قاعدة القدم.

(ب) نستعمل مجموعة محاور xy كما هو مبيّن في (الشكل 7-27ب) ، أولًا ، نحسب كم إلى اليمين من مفصل الحوض يقع مركز الكتلة، بأخذ الأجزاء الثلاثة كلها:

$$x_{CM} = \frac{(21.5)(9.6) + (9.6)(23.6) + (3.4)(23.6)}{21.5 + 9.6 + 3.4} = 14.9 \text{ وحدة}$$



الشكل 7-27 (المثال 7-13) : حساب مركز كتلة الرجل في وضعين مختلفين باستعمال نسب مئوية من (الجدول 7-1). (⊗ تمثل مركز الكتلة الذي تم حسابه)

للشخص الذي طوله 1.70-m يكون ذلك $(1.70\text{ m})(14.9/100) = 0.25\text{ m}$ من مفصل الورك، ثم نحسب المسافة y_{CM} لمركز الكتلة CM فوق أرض الغرفة:

$$y_{CM} = \frac{(3.4)(1.8) + (9.6)(18.2) + (21.5)(28.5)}{21.5 + 9.6 + 3.4} = 23.0 \text{ وحدة}$$

أو $(1.70\text{ m})(23.0/100) = 0.39\text{ m}$. وهكذا يقع مركز الكتلة فوق أرض الغرفة بـ 39 cm و 25 cm إلى يمين مفصل الورك.

ملحوظة: يقع مركز الكتلة خارج الجسم في (ب)

إنّ معرفة مركز الكتلة لجسم وهو في مواقع مختلفة يُستعمل كثيرًا في دراسة ميكانيكا الأجسام. مثالٌ بسيط من الرياضة يبيّنه (الشكل 7-28). إذا استطاع رياضيّ القفز العالي أن يصل إلى المكان المبين في الشكل، فيمكن لمركز الكتلة أن يمرَّ تحت العارضة التي يكون الجسم فوقها، وهذا يعني بسرعة انطلاقٍ معيّنةٍ يمكنهم تجاوز عارضةً أعلى. وهذا ما يحاولون عمله في الحقيقة.



الشكل 7-28 مركز الكتلة لرجل يقفز. في الواقع، يمكن أن يكون تحت العارضة.

تطبيق الفيزياء
القفز العالي.

* 7-10 مركز الكتلة والحركة الانتقالية

كما ذكرنا في (البند 7-8)، فإنّ السبب الرئيس لأهميّة مبدأ مركز الكتلة هو أنّ حركة مركز الكتلة لنظامٍ من الجسيمات (أو جسم لا نقطي) ترتبط مباشرةً بالقوّة المحصّلة المؤثّرة في هذا النظام ككل. وسنبيّن ذلك الآن آخذين الحالة البسيطة للحركة في بُعدٍ واحد (اتجاه x) ولثلاثة جسيمات فقط، كما أنّ توسيع ذلك ليشمل أجسامًا أكثر وفي ثلاثة أبعادٍ يتبع الخطوط نفسها.

افرض أن الجسيمات الثلاثة تقع على محور x وكتلها هي: m_A, m_B, m_C ومواقعها كالآتي: x_A, x_B, x_C. من (المعادلة 7-9أ) لمركز الكتلة يمكننا كتابة.

$$Mx_{CM} = m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C \qquad \text{(i)}$$

حيث $M = m_A + m_B + m_C$ هي الكتلة الكليّة للنظام. إذا كانت هذه الجسيمات متحرّكة (مثلًا على امتداد محور x وبسرعة v_A, v_B, v_C على الترتيب) عندها وفي وقت قصير Δt تكون كلّها تحركت مسافة

$$\Delta x_A = x'_A - x_A = v_A \Delta t$$
$$\Delta x_B = x'_B - x_B = v_B \Delta t$$
$$\Delta x_C = x'_C - x_C = v_C \Delta t$$

حيث x'_A, x'_B, x'_C تمثّل أماكنها الجديدة بعد فترةٍ زمنية Δt. موقع مركز الكتلة الجديد يعطى بالعلاقة:

$$Mx'_{CM} = m_A x'_A + m_B x'_B + m_C x'_C \qquad \text{(ii)}$$

إذا طرحنا من هذه المعادلة (ii) المعادلة السابقة (i) فإنّنا نحصل على

$$M\Delta x_{CM} = m_A \Delta x_A + m_B \Delta x_B + m_C \Delta x_C.$$

خلال هذه الفترة الزمنية Δt، يكون مركز الكتلة قد تحرك مسافة

$$\Delta x_{CM} = x'_{CM} - x_{CM} = v_{CM} \Delta t$$

حيث v_{CM} هي سرعة مركز الكتلة. ونعوض الآن العلاقات تلك Δx's في المعادلة السابقة:

$$Mv_{CM} \Delta t = m_A v_A \Delta t + m_B v_B \Delta t + m_C v_C \Delta t$$

ونختصر Δt لنحصل على

$$Mv_{CM} = m_A v_A + m_B v_B + m_C v_C \qquad \text{(7-10)}$$

بما أن $m_A v_A + m_B v_B + m_C v_C$ هو مجموع الزخم لجسيمات النظام، فإنّها تمثّل الزخم الكلّي للنظام كلّه. لذا نرى من (المعادلة 7-10) أنّ الزخم الخطّي الكلّي لنظامٍ من الجسيمات يساوي حاصل ضرب الكتلة الكليّة M وسرعة مركز الكتلة للنظام. أو الزخم الخطّي لجسمٍ لا نقطي هو حاصل ضرب كتلة الجسم وسرعة مركز كتلته.

الزخم الكلي وسرعة مركز الكتلة.

إذا أثّرت القوى في الجسيمات، فمن الممكن أن تتسارع الجسيمات في فترةٍ قصيرةٍ من الزمن. سرعة كلّ جسيمٍ سوف تتغيّر بمقدار

$$\Delta v_A = a_A \Delta t, \quad \Delta v_B = a_B \Delta t, \quad \Delta v_C = a_C \Delta t$$

وإذا استعملنا التحليل نفسه كما فعلنا عند اشتقاق(المعادلة 7-10) ، فإنّنا نحصل على

$$Ma_{CM} = m_A a_A + m_B a_B + m_C a_C$$

وتبعًا لقانون نيوتن الثاني $m_A a_A = F_A$, $m_B a_B = F_B$ و $m_C a_C = F_C$ حيث F_A, F_B, F_C هي القوى المحصّلة على الجسيمات الثلاثة، على الترتيب. فإنّنا نحصل على نظامٍ كامل $Ma_{CM} = F_A + F_B + F_C$ أو

$$Ma_{CM} = F_{net} \qquad \textbf{(11-7)}$$

قانون نيوتن الثاني لنظام من الجسيمات أو جسم لا نقطي.

أي أنّ مجموع القوى المؤثّرة كلّها في النظام تساوي كتلة النظام مضروبةً في تسارع مركز الكتلة . وهذا هو قانون **نيوتن الثاني** لنظام من الجسيمات، وينطبق كذلك على جسمٍ لا نقطي (الذي يمكن التفكير فيه كتجمع للجسيمات).

وهكذا، نستنتج أنّ مركز كتلة مجموعة من الجسيمات (أو جسم لا نقطي) بكتلةٍ كليّة M يتحرّك كجسيمٍ واحد كتلته M ويتأثر. بالقوّة المحصّلة الخارجيّة نفسها. أي أنّ المجموعة تتحرّك كما لو كانت كتلتها كلّها مركّزةً عند مركز الكتلة، والقوى الخارجية كلّها تؤثّر عند تلك النقطة. ولذلك نستطيع معالجة الحركة الانتقالية لأيّ جسمٍ أو مجموعةٍ من الجسيمات كحركة جُسيمٍ واحد (انظر الشكلين 7-21 و 7-22). هذه النتيجة تسهل تحليلنا لحركة الأجسام المعقّدة. ومع أنّ حركة الأجزاء المختلفة للنظام قد تكون معقّدة، إلّا أنّنا نقنع عادةً بمعرفة حركة مركز الكتلة. هذه النتيجة تسمح لنا أيضًا بحلّ بعض أنواع المسائل بسهولةٍ كبيرة، كما هو مبين في المثال التالي.

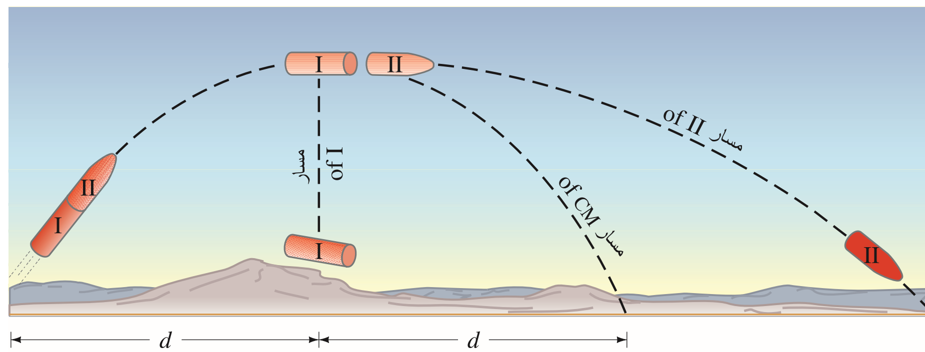
المثال المفاهيمي 7-14 **الصاروخ ذو المرحلتين**

يُطلق صاروخٌ في الهواء، كما يبين (الشكل 7-29). وعند وصول الصاروخ إلى أعلى نقطةٍ له، على بعد d من نقطة انطلاقه، يفصله انفجارٌ معدٌّ له مسبقًا إلى جزأين متساويي الكتلة. يتوقّف الجزء I بواسطة الانفجار في الهواء ويسقط رأسيًّا نحو الأرض. ولكن، أين يسقط الجزء II؟ افرض $\vec{g}$ = ثابتًا.

الحل: بعد انطلاق الصاروخ، فإنّ مسار مركز كتلة النظام يستمرُّ في اتباع القطع المكافئ لمقذوفٍ يخضع لقوّةٍ واحدةٍ هي قوّة الجاذبية. وهكذا، فإنّ مركز الكتلة سوف يهبط عند نقطةٍ تبعد مسافة $2d$ من نقطة البداية. وبما أنّ كتلتي الجزأين I و II متساويتان، فإنّ مركز الكتلة يكون في منتصف المسافة بينهما عند أيّ لحظة. ولذلك، فإنّ الجزء II يسقط على مسافة $3d$ من نقطة الانطلاق.

ملحوظة: لو أُعطي الجزء I دفعةً نحو الأعلى أو نحو الأسفل بدلًا من مجرّد السقوط، فإنّ الحلّ سيكون معقّدًا أكثر.

التمرين ط: إذا وقفت سيّدةٌ في قارب تجذيف، وكانت تسير من إحدى نهايتي القارب إلى النهاية الأخرى، فكيف يتحرّك القارب كما يبدو من الشاطئ؟



الشكل 7-29 (المثال 7-14)

ملخص

يُعرَّف **الزخم** $\vec{\mathbf{p}}$، لجسمٍ بأنّه حاصل ضرب كتلته في سرعته

$$\vec{\mathbf{p}} = m\vec{\mathbf{v}}. \quad (1\text{-}7)$$

وبدلالة الزخم، يمكن كتابة **قانون نيوتن الثاني** كالتالي

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{p}}}{\Delta t} \quad (2\text{-}7)$$

أي أنّ معدّل تغيّر الزخم يساوي محصّلة القوى المؤثّرة.

ينصّ **قانون حفظ الزخم** على أنّ الزخم الكلّيّ لنظامٍ معزولٍ من الأجسام يبقى ثابتاً.

النظام المعزول هو. الذي تكون محصّلة القوى المؤثّرة فيه تساوي صفراً.

قانون حفظ الزخم مفيدٌ جدًّا في معالجة **التصادمات**. في التصادم، جسمان (أو أكثر) يتفاعلان معاً في فترةٍ زمنيّةٍ قصيرةٍ جدًّا، والقوى المتبادلة بينها تكون كبيرةً جدًّا.

يُعرّف دفع قوّةٍ ما على جسم بـ $\vec{\mathbf{F}}\,\Delta t$، حيث $\vec{\mathbf{F}}$ هي متوسّط القوّة المؤثّرة خلال الفترة الزمنية Δt، الدفع يساوي التغيّر في زخم الجسم :

$$\text{الدفع} = \vec{\mathbf{F}}\,\Delta t = \Delta\vec{\mathbf{p}} \quad (5\text{-}7)$$

يكون الزخم الكلّيّ محفوظاً في أيّ تصادمٍ ما دامت القوّة المحصّلة تساوي صفراً أو مهملة.

إذا كان $m_A\vec{\mathbf{v}}'_A$ و $m_B\vec{\mathbf{v}}'_B$، هما الزخمان لجسمين قبل التصادم، زخمهما بعد التصادم، فإنّ حفظ الزخم يخبرنا بالتالي:

$$m_A\vec{\mathbf{v}}_A + m_B\vec{\mathbf{v}}_B = m_A\vec{\mathbf{v}}'_A + m_B\vec{\mathbf{v}}'_B \quad (3\text{-}7)$$

لهذا النظام المكوّن من جسمين.

الطاقة الكليّة كذلك محفوظةً، ولكن ذلك قد لا يساعد في حلِّ المسائل إلّا إذا كان تحوّل الطاقة يشمل الطاقة الحركيّة. الطاقة الحركيّة في هذه الحالة محفوظة، ويُدعى **بالتصادم المرن**، ويمكننا كتابة :

$$\tfrac{1}{2}m_A v_A^2 + \tfrac{1}{2}m_B v_B^2 = \tfrac{1}{2}m_A v_A'^2 + \tfrac{1}{2}m_B v_B'^2 \quad (6\text{-}7)$$

إذا لم تكن الطاقة الحركيّة محفوظةً فيُسمّى عندها التصادم "غير مرن"

. التصادم عديم المرونة هو ذلك الذي يلتصق فيه الجسمان المتصادمان معاً بعد التصادم .

مركز الكتلة CM لجسمٍ لا نقطي (أومجموعة أجسام) هو تلك النقطة التي تكون فيها القوّة المحصّلة مؤثّرة، لأغراض تحديد الحركة الانتقاليّة للجسم ككل. تُعطى المركبة x لمركز الكتلة لأجسام كتلتها $m_A, m_B, \ldots$ بالعلاقة التالية:

$$x_{CM} = \frac{m_A x_A + m_B x_B + \cdots}{m_A + m_B + \cdots} \quad (\text{أ}9\text{-}7)$$

[*الحركة الكاملة لجسمٍ ما يمكن وصفها بأنّها الحركة الانتقاليّة لمركز الكتلة بالإضافة إلى دوران (أو أيّ حركة داخلية أخرى) حول مركز الكتلة.]

أسئلة

1. ندّعي أنَّ الزخم محفوظ، علمًا بأنّ معظم الأجسام تتباطأ وأخيرًا تتوقف، فسّر ذلك.

2. عندما يقفز شخصٌ من على شجرة إلى الأرض، ماذا يحدث لزخمه عند اصطدامه بالأرض ؟

3. عندما تفلت بالوناً مملوءاً بالهواء ولكنّه غير مربوط، فإنّه لا يطير عبر الغرفة. لماذا؟

4. يُحكى أنّه في العصور القديمة ، تجمّد رجلٌ غنيٌّ كان يحمل كيسًا من الذهب، في أثناء وقوفه على بحيرة متجمّدة . لأنّ الجليد كان عديم الاحتكاك لم يستطع الرجل دفع نفسه نحو الشاطىء. ماذا كان يمكنه أن يفعل كي لا يكون بائسًا على هذا النحو ؟

5. كيف يستطيع الصاروخ تغيير اتّجاهه عندما يكون بعيداً في الفضاء، وفي الواقع يكون في الفراغ ؟

6. تبعاً للمعادلة 7-5، كلّما كان وقت التصادم أكبر كانت القوّة أصغر لنفس التغيّر في الزخم، ومن ثَمّ كان التشوّه أقلّ في الجسم الذي تؤثّر فيه القوّة. على هذا الأساس، فسّر قيمة أكياس الهواء التي وُضعت كي تنتفخ خلال تصادم السيارة وتخفض إمكانية الأذى والموت.

7. تُبنى السيارات عادةً لتكون صُلبة لتقاوم الصدمات. أمّا الآن، فتُبنى السيارة وفيها مناطق تُطوى وتنهار عند الصدمة ، ما فائدة هذا التصميم الجديد؟

8. لماذا يستطيع الرامي أن يبعد كرة بيسبول لمسافةٍ أبعد، إذا كانت أصلاً مضروبةً منها لو أنّ الرامي قذفها في الهواء؟

9. هل يمكن لجسمٍ أن يتلقّى دفعاً من قوّةٍ صغيرةٍ أكبر من الذي يتلقاه من قوة كبيرة؟ فسّر.

10. جسمان؛ الأول خفيفٌ والآخر ثقيلٌ لهما الطاقة الحركيّة نفسها، فأيّهما له زخم أكبر؟علّل.

11. صف تصادمًا تضيع فيه الطاقة الحركيّة كلّها.

12. في محطّة توليد كهرومائية يتمّ توجيه الماء بسرعةٍ عاليةٍ إلى عنفات التوربين المركّبة على محورٍ لتعمل على ادارة مولدٍ كهربائي. للحصول على أعلى قدرةٍ كهربائيّة، هل تُصمّم العنفات بحيث تعمل على ايقاف الماء عند اصطدامه بها ليرتدّ الماء عنها؟

13. ضربت كرة سكواش جدارا بزاوية °45 كما يبين (الشكل 7-30). ما اتّجاه:

أ) تغيير الزخم للكرة

ب) القوّة على الجدار

14. أُسقطت كرةٌ من ارتفاع h على صفيحة قاسية من الفولاذ (مثبتة إلى الأرض)؛ حيث ترتدّ بالسرعة الأصلية نفسها.

(أ)هل زخم الكرة محفوظٌ خلال أيّ جزءٍ من هذه العمليّة؟

(ب)إذا اعتبرنا الكرة والأرض نظامًا واحدًا، فخلال أي أجزاءٍ من العمليّة يكون الزخم محفوظًا ؟

(جـ)أجب عن الجزء (ب) لقطعة من الطين تسقط وتلتصق بصفيحة الفولاذ.

الشكل 7-30
(السؤال 13)

15. لماذا عليك الانحناء إلى الخلف عندما تحمل حملاً ثقيلاً بين ذراعيك؟

16. لماذا يكون مركز الكتلة لأنبوبٍ طوله 1-m في منتصفه، في حين لا يكون ذلك صحيحاً لذراعك أو رجلك ؟

***17.** بيّن في رسمٍ بسيطٍ كيف يتغيّر مركز كتلة جسمك عندما تتحوّل من وضع الاستلقاء إلى الجلوس.

***18.** إذا كانت القوّة الخارجيّة فقط تستطيع تغيير زخم مركز الكتلة لجسمٍ ما، فكيف تستطيع القوّة الداخلية لمحرّكٍ أن تسارع السيارة؟

***19.** صاروخٌ يتبع مسار قطعٍ مكافيء خلال الهواء، ينفجر فجأةً لقطعٍ كثيرة. كيف تصف حركة هذا النظام من القطع الصغيرة ؟

7-1 و 7-2 الزخم الخطي وحفظه

1. (I) ما مقدار الزخم لوطواط كتلته 28-g يطير بسرعة 8.4 m/s؟

2. (I) قوة احتكاك ثابتة 25 N تؤثّر في متزلّج كتلته 65-kg لمدة 20s. ما مقدار التغير في سرعة المتزلّج؟

3. (II) ضُربت كرة بيسبول كتلتها 0.145-kg بسرعة 39.0 m/s وارتدت على خطٍّ أفقيٍّ مستقيمٍ وبسرعة 52.0 m/s. إذا كان زمن التلامس بين الكرة والمضرب 3.00×10^{-3} s، فاحسب القوّة المتوسّطة بين الكرة والمضرب في أثناء التلامس.

4. (II) يقذف طفل في قارب رزمةً كتلتها 6.40-kg أفقيًّا وبسرعة 10.0 m/s، (الشكل 7-31) احسب سرعة القارب فور قذف الرزمة، بفرض أنّ القارب كان ساكنًا في البداية. كتلة الطفل 26.0 kg وتلك للقارب 45.0 kg. اهمل مقاومة الماء.



الشكل 7-31 (السؤال 4)

5. (II) احسب القوة المؤثّرة في صاروخ، إذا علمت أنّ غازات الدفع تطلق (تنفث) بمعدّل 1500 kg/s وبسرعة 4.0×10^4 m/s (لحظة الإقلاع).

6. (II) يتحرّك ظهيرٌ خلفيٌّ كتلته 95-kg بسرعة 4.1m/s، هوجم هذا اللاعب من الخلف بواسطة لاعبٍ آخر كتلته 85-kg يركض بسرعة 5.5 m/s بالاتجاه نفسه. ماذا كانت سرعتاهما المتبادلة حالًا بعد التصادم؟

7. (II) عربة كتلتها 12,600-kg تسير مفردةً على سكّةٍ مستوية ملساء وبسرعة ثابتة 18.0 m/s. أُسقط حِملٌ من السكون كتلته 5350-kg على العربة. ماذا ستكون السرعة الجديدة للعربة؟

8. (II) شاحنة كتلتها 9300-kg تسير بسرعة 15.0 m/s لتصدم شاحنةً أخرى ساكنة. تلتصق الشاحنتان وتسيران بسرعة 6.0 m/s ما كتلة الشاحنة الثانية؟

9. (II) خلال عاصفة شيكاغو تهبُّ الرياح بسرعةٍ أفقيّة 100 km/h. إذا ارتطم الهواء بشخصٍ بمعدّل 40 kg/s للمتر المربع الواحد ليتوقّف بعدها، فاحسب القوّة التي يؤثّر فيها الهواء على الشخص، مفترضًا أنّ طول الشخص 1.50 m وعرضه 0.50 m. قارن مع قوّة الاحتكاك القصوى ($\mu \approx 1.0$) بين الشخص والأرض إذا كانت كتلة الشخص 70 kg.

10. (II) عربة قطار مفتوحة كتلتها 3800-kg تسير بسرعةٍ ثابتةٍ 8.60 m/s على سكّةٍ مستوية. بدأ الثلج يتساقط عموديًّا ليملأ العربة بمعدّل 3.50 kg/min. بإهمال الاحتكاك مع السكّة، ما سرعة العربة بعد 90.0 min؟

11. (II) تتحرّك نواة ذرّة بسرعة 420 m/s، تشعُّ جسيم ألفا باتجاه سرعتها نفسه، بحيث تنخفض سرعة النواة المتبقّية إلى 350 m/s. إذا كانت كتلة جسيم ألفا 4.0 u والنواة الأصلية 222 u، فما سرعة جسيم ألفا عند لحظة إشعاعه؟

12. (II) طلقة كتلتها 23-g تسير بسرعة 230 m/s لتخترق قطعةً خشبيّةً كتلتها 2.0-kg وتنفذ منها بسرعة 170 m/s. إذا كانت القطعة ساكنةً على سطحٍ أملس عند ضربها، فما سرعتها بعد أن تنفذ الطلقة؟

13. (III) صاروخٌ ذو مرحلتين، كتلته 975-kg، كان ينطلق بسرعة 5.80×10^3m/s بالنسبة إلى الأرض عندما حصل انفجارٌ ، مصمّمٌ فصله إلى جزأين متساويين في الكتلة، يسيران بسرعة 2.20×10^3 m/s بالنسبة إلى بعضهما وعلى خطّ سيرهما الأصليّ نفسه. (أ) ما سرعة كلٍّ منهما واتجاهه (بالنسبة إلى الأرض) بعد الانفجار؟ (ب) ما مقدار الطاقة التي زوّدها الانفجار؟ [تنويه: ما التغيّر في الطاقة الحركيّة نتيجةً للانفجار؟]

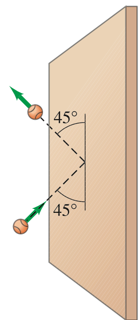
14. (III) يسير صاروخ كتلته الكليّة 3180 kg في الفضاء الخارجيّ بسرعة 115 m/s. لتعديل مساره بـ35.0°، يجب اطلاق صواريخه باتجاهٍ عموديٍّ على مساره الأصلي. إذا نفثت غازات الصاروخ بسرعة 1750 m/s فما الكتلة التي يجب أن تنفث؟

7-3 التصادمات والدفع

15. (II) كرة (غولف) كتلتها 0.045 kg ضُربت بسرعة 45 m/s، كان زمن تلامس المضرب بالكرة 3.5×10^{-3} s. جد: (أ) الدفع المؤثّر في الكرة. (ب) القوّة المتوسّطة على الكرة من المضرب.

16. (II) مطرقة كتلتها 12-kg تضرب مسمارًا بسرعة 8.5 m/s لتتوقّف خلال 8.0 ms. (أ) ما الدفع الذي يُعطى للمسمار؟ (ب) ما القوّة المتوسّطة المؤثرة في المسمار؟

17. (II) كرة تنس كتلتها $m = 0.060$ kg وسرعتها $v = 25$ m/s تضرب (جدارًا) بزاوية 45° وترتدّ بالسرعة نفسها وبزاوية 45° (الشكل 7-32). ما الدفع (مقدارًا واتجاهًا) المُعطى للكرة؟

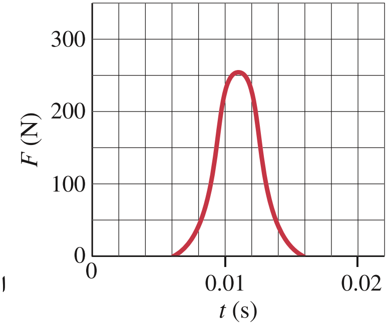


الشكل **7-32** (السؤال 17)

18. (II) افرض أنّك مهندس تصميمٍ مكلّفٌ باختبار قدرة تحمّل التحطّم للنماذج الجديدة للسيارات. تختبر وبسرعة 50 km/h نموذجاً جديداً كتلته 1500 kg يستغرق 0.15 s منذ ارتطامه حتى يتوقف. احسب: (أ) متوسّط القوّة المؤثّرة من الحاجز على السيّارة. (ب) متوسّط التباطؤ للسيّارة.

19. (II) يركض لاعب كرة قدم، كتلته 95-kg بسرعة 4.0 m/s نحو الشرق، ويتوقف خلال 0.75 s عندما يصطدم بلاعبٍ آخر يركض نحو الغرب. احسب ما يلي: (أ) الزخم الأصلي للاعب الأول. (ب) الدفع المؤثّر في اللاعب الأول. (ج) الدفع المؤثّر في اللاعب الثاني. (د) متوسّط القوّة المؤثّرة في الثاني.

20. (II) افرض أنّ القوّة المؤثّرة في كرة تنس (كتلتها 0.060 kg) تشير إلى $+x$ وتُعطى كما في الشكل 7-33 كدالة بالزمن. استعمل طريقة الرسم لتقريب (أ) الدفع الكلّي المُعطى للكرة. (ب) سرعة الكرة بعد التصادم على افتراض أنّها بدأت من السكون.



الشكل **7-33** (المسألة 20).

21. (III) من أيّ أقصى ارتفاع يستطيع شخص كتلته 75-kg أن يقفز من غير أن يكسر ساق إحدى رجليه؟ اهمل مقاومة الهواء، وافرض أنّ مركز كتلة الشخص يتحرّك مسافة 0.60 m من حالة الوقوف إلى حالة القرفصاء. افرض أن شدّة الكسر (قوّة لكلّ وحدة مسافة) للعظام 170×10^6 N/m^2 وأصغر مساحة مقطع 2.5×10^{-4} m^2 [تحذير: لا تحاول عمل هذه التجربة].

(4-7) و(5-7) التصادمات المرنة

22. (II) كرة كتلتها 0.440 kg تتحرّك نحو الشرق (اتجاه $+x$) بسرعة 3.30 m/s تصطدم مباشرة بكرةٍ أخرى كتلتها 0.220-kg ساكنة. إذا كان التصادم تامّ المرونة، فماذا ستكون السرعة والاتجاه لكلٍّ من الكرتين بعد التصادم؟

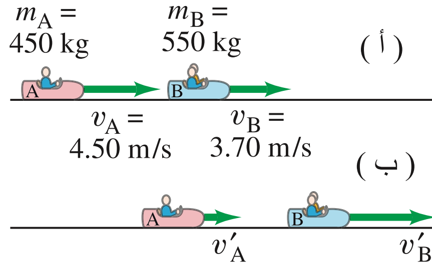
23. (II) زلّاجة جليد كتلتها 0.450-kg تتحرّك نحو الشرق بسرعة 3.00 m/s تصطدم بزلّاجة أخرى كتلتها 0.900-kg ساكنة. افرض تصادمًا تامَّ المرونة، ماذا ستكون السرعة واتجاهها لكلِّ جسمٍ بعد التصادم؟

24. (II) تصطدم كرتا بلياردو متساويتان بالكتلة تصادمًا مباشرًا مرنًا. إذا كانت سرعة إحداهما الابتدائية 2.00 m/s والأخرى 3.00 m/s بالاتجاه المعاكس، فماذا ستكون سرعتاهما بعد التصادم؟

25. (II) كرة تنس كتلتها 0.060-kg تتحرّك بسرعة 2.50 m/s تصطدم مباشرة بكرةٍ كتلتها 0.090-kg تتحرّك في البداية مبتعدة عنها بسرعة 1.15 m/s. افرض تصادمًا تامّ المرونة. ما سرعة كلِّ كرةٍ بعد التصادم واتجاهها؟

26. (II) تصطدم كرةٌ كتلتها 0.220 kg تتحرّك بسرعة 8.5 m/s مباشرةً مع كرةٍ أخرى ساكنةً تصادمًا مرنًا. بعدها، ترتدّ الكرة الأولى نحو الخلف بسرعة 3.7 m/s احسب: (أ) سرعة الكرة الثانية بعد التصادم. (ب) كتلة الكرة الثانية.

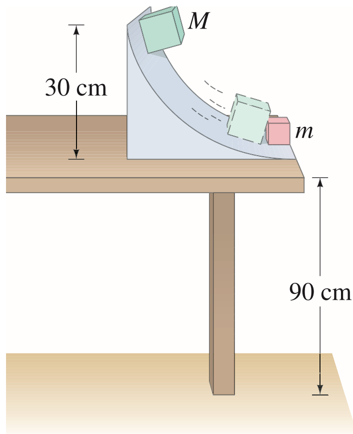
27. (II) تصطدم سيارتان في مدينة ألعاب تصادمًا مرنًا عندما تقترب أحداهما من الأخرى من الخلف (الشكل 7-34). السيارة A كتلتها 450 kg والسيارة B كتلتها 550 kg بسبب اختلاف كتلة الركاب. إذا اقتربت A بسرعة 4.50 m/s وتسير B بسرعة 3.70 m/s، فاحسب (أ) سرعتيهما بعد التصادم و (ب) التغيّر في زخم كل منهما.



الشكل **7-34** (المسألة 27) (أ) قبل التصادم. (ب) بعد التصادم.

28. (II) تصطدم كرةٌ كتلتها 0.280-kg تصادمًا مباشرًا مرنًا مع كرةٍ أخرى ساكنة. تنطلق الكرة الثانية بسرعةٍ تساوي نصف سرعة الأولى. (أ) ما كتلة الكرة الثانية؟ (ب) ما النسبة من الطاقة الحركيّة الأصليّة (ΔKE/KE) التي تتحوّل إلى الكرة الثانية؟

29. (III) في مختبر الفيزياء، ينزلق مكعبٌ على سطح مائلٍ عديم الاحتكاك كما في الشكل 7-35، ليصطدم تصادمًا مرنًا مع مكعبٍ آخر أسفل السطح وله كتلةٌ تساوي نصف كتلة المكعب الأول. إذا كان ارتفاع المنحدر 30 cm وارتفاع الطاولة 90 cm، فأين يسقط كلّ من المكعبين؟ [تنويه: كلٌّ من المكعبين يغادر السطح المائل، أفقيًا].



الشكل **7-35** (السؤال 29)

30. (III) اعتبر الحالة العامة لجسم A كتلته m_A وسرعته v_A يصطدم تصادمًا مرنًا مباشرًا بجسم ساكن ($v_B = 0$) وكتلته m_B. (أ) بيّن أنّ السرعتين النهائيتين v'_A, v'_B تعطيان بـ

$$v'_A = \left(\frac{m_A - m_B}{m_A + m_B}\right)v_A$$

$$v'_B = \left(\frac{2m_A}{m_A + m_B}\right)v_A$$

(ب) ماذا يحدث في الحالة القصوى عندما تكون m_A أصغر بكثيرٍ من m_B؟ اعط مثالًا شائعًا على ذلك.
(جـ) ماذا يحدث في الحالة القصوى عندما تكون m_A أكبر بكثير من m_B، اعط مثالًا شائعًا على ذلك، (d) ماذا يحدث عندما $m_A = m_B$؟ اعط مثالًا شائعًا!

6-7 التصادمات غير المرنة

31. (I) في تجربة البندول القذفي، المقذوف 1 يعطي ارتفاع h للبندول يساوي 2.6 cm، مقذوف آخر يعطي البندول ارتفاع h_2 ضعف الأول، $h_2 = 5.2$ cm. فبكم مرّةٍ كان المقذوف الثاني أسرع من الأول؟

32. (II) طلقة بندقيّة كتلتها 28-g تسير بسرعة 230 m/s لتغرس نفسها ببندول كتلته 3.6-kg معلّق بخيطٍ طوله 2.8-m مما أدّى بالبندول إلى أن يتأرجح في قوس. حدّد المركبتين العموديّة والأفقيّة لإزاحة البندول.

33. (II) (أ) اشتق صيغةً لنسبة الطاقة الحركيّة الضائعة $\Delta KE/KE$، لتصادم البندول القذفي في (المثال 7-10) (ب) جد القيمة، علمًا بأنّ $M = 380$ g و $m = 14.0$ g.

34. (II) انفجارٌ داخليٌّ يفلق جسمًا ساكنًا إلى قطعتين، إحداهما كتلتها 1.5 مرّة كتلة الأخرى. إذا أُطلقت 7500 J في الانفجار، فما الطاقة الحركيّة التي تكسبها كل قطعة؟

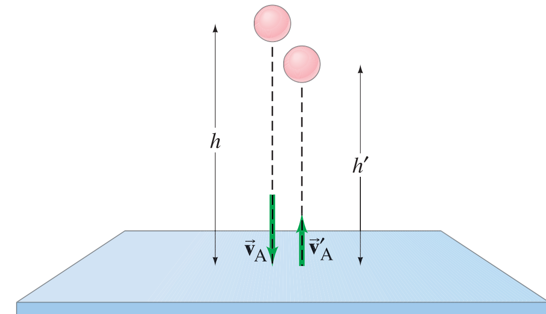
35. (II) سيارةٌ رياضيّة كتلتها 920-kg تصطدم بمؤخّرة سيّارةٍ أخرى كتلتها 2300-kg SUV متوقّفة عند إشارةٍ حمراء. تنزلق السيارتان معًا مسافة 2.8 m قبل التوقف. ضابط الشرطة يعرف أنّ معامل الاحتكاك الحركي بين العجلات والأرض 0.80 ويريد حساب سرعة الرياضية عند التصادم، كم كانت هذه السرعة؟

36. (II) أُسقطت كرةٌ من ارتفاع 1.50 m لترتدّ إلى ارتفاع 1.20 m. تقريبًا، كم ارتداداً تعمل هذه الكرة قبل أن تكون قد خسرت 90% من طاقتها؟

37. (II) إنّ مقياس اللامرونة في تصادمٍ مباشرٍ لجسيمين يُعرف بمعامل الارتداد، e،

$$e = \frac{v'_A - v'_B}{v_B - v_A}$$

حيث $v'_A - v'_B$ هي السرعة النسبية للجسمين بعد التصادم و $v_B - v_A$ هي سرعتهما النسبية قبله. (أ) بيّن أن $e = 1$ لتصادمٍ تامّ المرونة و $e = 0$ لتصادم عديم المرونة. (ب) هناك طريقةٌ بسيطةٌ لقياس معامل الارتداد، e، لتصادم جسمٍ بسطحٍ صُلبٍ مثل قطعةٍ من الفولاذ، وهي بإسقاط الجسم على صفيحةٍ ثقيلةٍ من الفولاذ كما هو مبيّن في الشكل 7-36. حدّد علاقة لـ e بدلالة الارتفاع الأصلي للجسم h وأقصى ارتفاع يصله الجسم بعد أول تصادم.



الشكل **7-36** (المسألة 37). قياس معامل الارتداد e.

38. (II) قُسمت قطعةٌ من الخشب إلى جزأين، كتلة أحدهما ثلاثة أمثال كتلة الآخر. عُمل تجويفٌ في وجهي القطعتين بحيث يمكن وضع متفجّر عند إعادة جمع القطعتين. ثم وُضعت القطعة المجمّعة على سطحٍ أفقيٍّ خشنٍ، وأُشعل الفتيل. عند الانفجار، تنفصل القطعتان وتسير كلٌّ منهما بعيدًا. ما النسبة بين المسافتين اللتين انزلقتهما القطعتان قبل التوقف؟

39. (III) جسم كتلته 15.0-kg يتحرّك باتجاه $+x$ وبسرعة 5.5 m/s يصطدم اصطداماً مباشرًا مع جسمٍ آخر كتلته 10.0-kg يسير بسرعة 4.0 m/s في اتجاه $-x$. احسب السرعة النهائية لكلٍّ من الجسمين إذا: (أ) التصق الجسمان معًا. (ب) كان التصادم مرنًا. (جـ) كان الجسم 15.0-kg ساكنًا بعد التصادم. (د) كان الجسم (-10.0 kg) ساكنًا بعد التصادم. (هـ) كانت سرعة الجسم (15.0-kg) هي 4.0 m/s باتجاه $-x$ بعد التصادم. هل النتائج في (جـ) و (هـ) و (د) " معقولة"؟ علل.

*7-7 التصادمات في بعدين

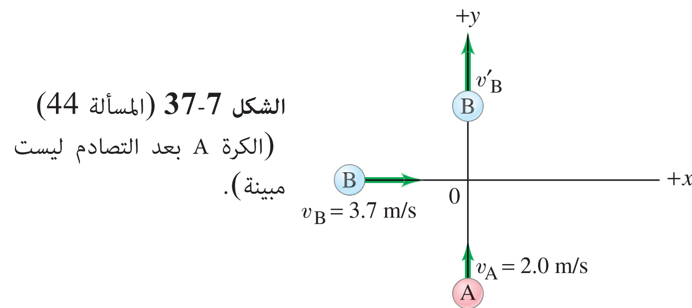
***40.** (II) نواةٌ مشعّةٌ ساكنةٌ تنحلُّ إلى نواةٍ ثانيةٍ وإلكترون ونيوترينو. انطلق الإلكترون والنيوترينو متعامدين ولهما زخم 9.30×10^{-23} kg.m/s و 5.40×10^{-23} kg·m/s على الترتيب. ما مقدار الزخم للنواة الثانية (المرتدة) واتجاهها؟

***41.** (II) نسرٌ (كتلته $m_A = 4.3$ kg) يتحرّك بسرعة $v_A = 7.8$ m/s في مسار تصادمٍ مع نسرٍ آخر ($m_B = 5.6$ kg) يتحرّك بسرعة $v_B = 10.2$ m/s باتجاهٍ عموديٍّ على الأول. وبعد اصطدامهما، يمسك أحدهما بالآخر. في أيّ اتجاه وبأي سرعة يتحركان بعد التصادم؟

***42.** (II) كرة بلياردو ($m_A = 0.400$ kg) تتحرك بسرعة $v_A = 1.80$ m/s تصطدم بكرة B، ساكنةً أصلاً، ($m_B = 0.500$ kg). نتيجة للتصادم تنحرف الكرة A بزاوية 30.0° وبسرعة $v'_A = 1.10$ m/s (أ) افترض أنّ محور x هو الاتجاه الأصليّ للكرة A، اكتب معادلات حفظ الزخم للمركبتين x و y منفصلتين. (ب) حل هاتين المعادلتين لإيجاد السرعة والزاويةللكرة b. لا تفرض أنّ التصادم مرن.

***43.** (III) بعد التصادم عديم المرونة بين جسمين متساويي الكتلة، وكلٌّ منهما له سرعة $v/3$، يتحرّك كلٌّ منهما مبتعدًا بسرعة؟ ما هي القيم؟ماذا كانت الزاوية بين اتجاهيهما الأصليين؟

***44.** (III) كرتا بلياردو متساويتان في الكتلة تسيران متعامدتين، وتلتقيان عند نقطة الأصل للمحاور xy، الكرة A تسير نحو الأعلى على محور y بسرعة 2.0 m/s أمّا الكرة B فتسير نحو اليمين على محور x بسرعة 3.7 m/s. بعد التصادم، بفرض أنّه مرن، الكرة B تسير على محور y الموجب (الشكل 7-37). ما الاتجاه النهائي للكرة A؟ وما هي قيمة سرعتيهما؟

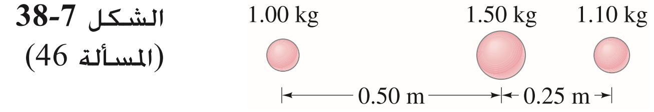


الشكل **7-37** (المسألة 44) (الكرة A بعد التصادم ليست مبينة).

***45.** (III) ذرة نيون ($m = 20.0$ u) تعمل تصادمًا تامَّ المرونة مع ذرةٍ أخرى ساكنة. بعد التصادم، تبتعد ذرة النيون بزاوية 55.6° عن اتجاهها الأصلي، في حين تبتعد الذرة المجهولة بزاوية -50.0° . ما الكتلة (بـ u) للذرّة المجهولة؟ [مساعدة: يمكنك استعمال قانون الجيوب].

7-8 مركز الكتلة

46. (I) جد مركز الكتلة للنظام الثلاثي المبيّن في (الشكل 7-38). حدّد نسبة للكتلة على اليسار 1.00-kg.



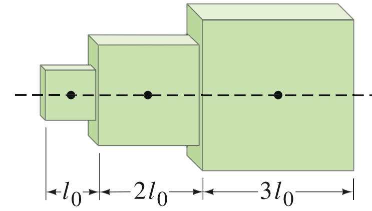
الشكل 7-38 (المسألة 46)

47. (I) المسافة بين ذرّة الكربون ($m_C = 12\,u$) وذرّة الأكسجين ($m_O = 16\,u$) في جزيء CO هي 1.13×10^{-10} m. كم يبعد مركز كتلة الجزيء عن ذرة الكربون؟

48. (I) يقع CM لسيارة فارغة كتلتها 1050-kg على بعد 2.50 m من مقدمة السيارة. كم يبعد CM للسيارة عندما يجلس شخصان في المقعد الأمامي للسيارة على بعد 2.80 m من مقدمتها وثلاثة أشخاص على المقعد الخلفي وعلى بعد 3.90 m من المقدمة؟ افرض أنّ كتلة كلّ شخص 70.0 kg.

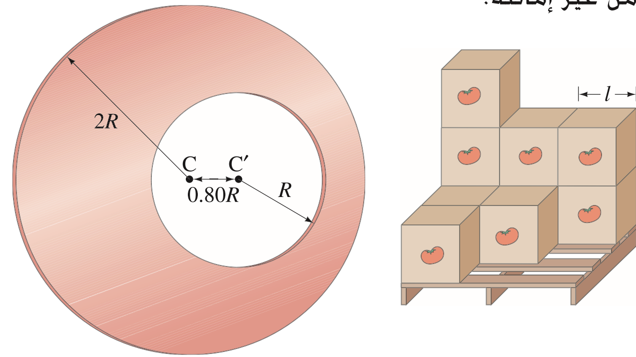
49. (II) طوّافة مربّعة منتظمة، 18 m في 18 m تستعمل زورق عبور. ثلاث سيارات كتلة كلٍّ منها 1200 kg تحتلّ الأركان: الشمالي الشرقي، الجنوبي الشرقي، الجنوبي الغربي من الزورق. جد مركز الكتلة للزورق المحمل.

50. (II) ثلاثة مكعبات أطوالها l_0، $2l_0$، $3l_0$ موضوعة بجانب بعضها متلامسةً، بحيث تكون مراكز كتلها على خطٍّ مستقيمٍ والمكعب ذو $l = 2l_0$ في الوسط (الشكل7-39). ما موقع مركز الكتلة لهذه المجموعة على هذا الخط؟ افرض أن المكعبات مصنوعة من المادة المنتظمة نفسها.



الشكل 7-39 (المسألة 50)

51. (II) منصّةٌ نقّالة (خفيفة الوزن) تحمل صناديق متماثلةً من معجون الطماطم (انظر الشكل 7-40)، كلٌّ منها عبارةً عن مكعبٍ طوله l. جد مركز الجاذبيّة في المستوى الأفقي، بحيث إنّ عامل الرافعة يستطيع رفع الحمل من غير إمالته؟



الشكل 7-40 (المسألة 51) **الشكل 7-41** (المسألة 52)

52. (III) لوحةٌ دائريّةٌ منتظمةٌ، نصف قطرها $2R$ تحتوي تجويفًا نصف قطره R أُخذ منها المركز C' للدائرة الصغيرة على بعد $0.80\,R$ من المركز C للدائرة الكبرى، (الشكل 7-41) . ما موقع مركز الكتلة للوحة؟[مساعدة: استعمل الطرح].

7-9* مركز الكتلة لجسم الإنسان

53.* (I) افرض أنّ نسب جسمك كالتي في (الجدول7-1)، احسب كتلة إحدى رجليك.

54. * (I) حدد CM لذراع ممدودة باستخدام (الجدول 7-1) .

55. * (II) استعمل (الجدول 7-1) لحساب موقع مركز الكتلة لذراعٍ مثنيّةٍ زاويةً قائمة. افرض أنّ طول الشخص 155 cm.

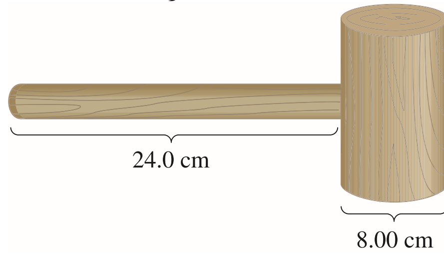
56. (II) عندما يكون لاعب القفز العالي في وضع تكون ذراعاه ورجلاه معلقات عموديًّا، ويكون جذعه ورأسه أفقيين، احسب على أيّ بعد تحت خطِّ وسط الجذع يقع مركز الكتلة. هل سيكون هذا المركز خارج الجسم؟ استعمل (الجدول 7-1)

7-10 مركز الكتلة والحركة الانتقالية.

57.* (II) كتلتا الأرض والقمر هما 5.98×10^{24} kg و7.35×10^{22}-kg على الترتيب، ويبعد مركزاهما 3.84×10^{8} m. (أ) أين يقع مركز الكتلة لهذا النظام؟ (ب) ماذا يمكنك القول عن حركة النظام، الأرض-القمر حول الشمس، وعن الأرض والقمر منفصلين حول الشمس؟

58.* (II) سيّدةٌ كتلتها 55-kg ورجلٌ كتلته 80-kg يقفان على بعد 10.0 m على جليدٍ عديم الاحتكاك. (أ) جد كم يبعد مركز كتلتهما عن المرأة؟ (ب) إذا أمسك كلٌّ منهما بطرف حبلٍ وسحبه الرجل بحيث تحرك الرجل 2.5 m فما بعده عن المرأه الآن؟ (جـ) كم المسافة التي يكون الرجل قد تحركها عندما يصطدم بالمرأة؟

59.* (II) مطرقةٌ خشبيّةٌ تتكوّن من رأسٍ أسطوانيٍّ منتظمٍ كتلته 2.00 kg وقطره 0.0800 m مركّب على يدٍ أسطوانية كتلتها 0.500 kg وطولها 0.240 m كما هو مبيّن في (الشكل 7-42). إذا قذفت هذه المطرقة لتدور في الهواء، فعلى أيّ ارتفاعٍ فوق قاعدة يد المطرقة ستكون النقطة التي تتبع مسار قطعٍ مكافئ؟



الشكل 7-42 (المسألة 59)

60.* (II) (أ) افرض أنّه في (المثال 7-14 الشكل 7-29) $m_{II} = 3m_I$. أين سوف تسقط m_{II} عند ذلك؟ (ب) ماذا لو كانت $m_I = 3m_{II}$ ؟

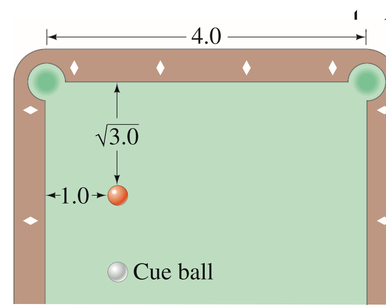
61.* (II) بالون هيليوم وعربته، كتلة M في الهواء ويبدو ساكنًا بانسبة الى الأرض. أحد الركاب، كتلته m، يتسلّق خارجًا، ثم ينزلق على حبلٍ بسرعة v بالنسبة الى البالون. بأيّة سرعةٍ وأيّ اتجاه (بالنسبة الى الأرض) سوف يتحرّك عندها البالون؟ ماذا يحدث لو توقف الراكب؟

مسائل عامة

62. كرة بيسبول كتلتها 0.145-kg قُذفت أفقيًّا بسرعة 35.0 m/s تصطدم بمضربٍ لتُقذف رأسيًّا نحو الأعلى إلى ارتفاع 55.6 m. إذا كان زمن التماس 1.4 ms، فاحسب القوة المتوسطة على الكرة خلال التماس.

63. صاروخٌ كتلته m يسير بسرعة v_0 على محور x يقذف وقودًا بصورةٍ مفاجئةٍ يساوي ثلث كتلته باتجاهٍ يوازي محور y (عموديًّا على الصاروخ كما يبدو من الأرض) وبسرعة $2v_0$. ما مركبات السرعة النهائية للصاروخ.

64.* لاعب بلياردو يواجه كرة، كما يبين (الشكل 7-43) الأبعاد النسبية معطاة أيضًا. هل سيقلق اللاعب حول الضربة التي قد تسقط كرة البدء في الجيب؟ أعط تفا



الشكل 7-43 (المسألة 64)

65. رائد فضاء كتلته 140-kg (ذلك يتضمّن الوحدة الفضائيّة) يكتسب سرعة 2.50 m/s بالدفع بقدميه من كبسولةٍ فضائيّةٍ كتلتها 1800-kg. (أ) ما التغيّر في سرعة كبسولة الفضاء؟ (ب) إذا دامت الدفعة 0.40 s فما القوة المتوسطة على الرائد من الكبسولة؟ استعمل موقع الكبسولة قبل الدفع إطارًا مرجعيًّا.

66. كان رائدا فضاء كتلتاهما 60 kg، 80 kg في حالة سكون في الفضاء ثم قام أحدهما بدفع الآخر. ما المسافة بينهما إذا كان الرائد الأقل وزنًا قد تحرك مسافة 12 m؟

67. كرةٌ كتلتها m تصطدم اصطدامًا مباشرًا مع كرةٍ أخرى (ساكنة) وترتدّ بالاتجاه المعاكس بسرعةٍ تساوي ربع سرعتها الأصلية. ما كتلة الكرة الثانية؟

68. استدعيت خبيرًا شاهدًا إلى المحكمة في حادث سير. الحادث يتضمّن المركبة A كتلتها 1900 kg اصطدمت بمركبة B واقفة وكتلتها 1100 kg. سائق المركبة A استخدم الكوابح على بُعد 15 m قبل أن يصطدم بالمركبة B. بعد التصادم انزلقت المركبة A، 18 m وانزلقت المركبة 30 m ،B معامل الاحتكاك الحركي بين العجلات والأرض كان 0.60. بيّن أنّ سائق المركبة A كان يتجاوز 55-mph (90 km/h) حدود السرعة قبل تطبيق الكوابح.

69. تتدحرج كرة جولف من أعلى درجات أسمنتية ارتفاعها الكلي 4.00 m اصطدمت الكرة أربع مرّاتٍ في طريقها للأسفل، وفي كل مرة كانت تصطدم بجزءٍ أفقيٍّ لدرجةٍ مختلفةٍ وعلى عمق 1.0 m من سابقتها. إذا كانت التصادمات كلّها تامّة المرونة، فما ارتفاع الارتداد في الصدمة الرابعة عندما تصل الكرة إلى أسفل الدرجات؟

70. أُطلقت طلقةٌ عموديًّا لتدخل قطعة خشبية كتلتها 1.40-kg ساكنةً رأسيًّا في الأعلى. إذا كانت كتلة الطلقة 29.0 g وسرعتها 510 m/s، فما الارتفاع الذي تصل إليه قطعة الخشب بعد دخول الطلقة؟

71. طلقةٌ كتلتها 25-g تصطدم وتنغرس في قطعةٍ من الخشب كتلتها 1.35-kg موضوعةً على سطحٍ أفقيٍّ أمام البندقية. إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين القطعة والسطح 0.25 والصدمة نقلت القطعة مسافة 9.5 m قبل أن تتوقّف، فماذا كانت سرعة انطلاق الطلقة؟

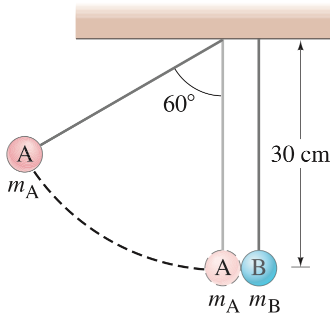
72. يجلس رجلان كتلتاهما 75 kg و 60 kg في قارب تجذيف كتلته 80 kg. إذا كان القارب ساكنًا في الأصل والشخصان يجلسان في مكانين متقابلين عند نهايتي القارب على بعد 3.2 m، فكم المسافة، وفي أيّ اتجاهٍ سوف يتحرّك القارب لو بدّل الشخصان مكانيهما؟

73. نيزك كتلته 1.0×10^8 kg اصطدم بالأرض $(m_E = 6.0 \times 10^{24}\,\text{kg})$ بسرعة حوالي 15 km/s واستقرّ ساكنًا بالأرض.(أ) ماذا كانت سرعة ارتداد الأرض؟ (ب) ما نسبة الطاقة الحركيّة التي تحوّلت من النيزك إلى الأرض؟ (ج) ما مقدار التغيّر في الطاقة الحركيّة للأرض نتيجة هذا التصادم؟

74. جسمٌ ساكنٌ انشطر فجأةً إلى جزأين نتيجة انفجار. اكتسب أحد الجزأين طاقةً حركيّةً ضعف التي اكتسبها الآخر. ما النسبة بين كتلتيهما؟

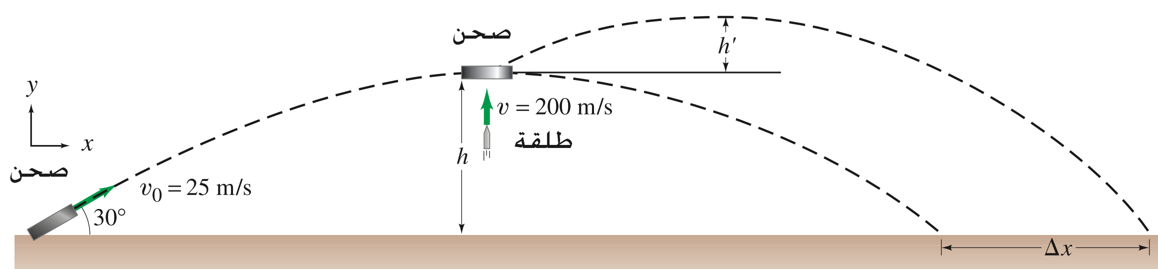
75. تُعطى القوّة على قذيفةٍ بالعلاقة $F = 580 - (1.8 \times 10^5)t$ خلال الفترة الزمنية $t = 0$ إلى $t = 3.0 \times 10^{-3}$ s حيث t بالثانية والقوّة بالنيوتن.(أ) ارسم علاقة بين F و t من $t = 0$ إلى $t = 3.0$ ms. (ب) جد بالتقريب وباستعمال طرائق الرسم الدفع الذي أعطي للقذيفة.(جـ) إذا وصلت القذيفة إلى سرعة 220 m/s نتيجة هذا الدفع الذي أُعطي لها عبر أسطوانة البندقية، فماذا ستكون كتلة القذيفة؟

76. كرتان كتلتاهما $m_A = 40$ g و $m_B = 60$ g معلقتان كما في (الشكل 7-44) أُزيحت الكرة الخفيفة جانبًا لتصنع زاوية $60°$ مع العمودي ثم أُفلتت. (أ) ما سرعة الكرة الخفيفة قبل التصادم؟ (ب) ما سرعة كلّ كرةٍ بعد التصادم المرن؟ (جـ) ما أقصى ارتفاع لكلٍّ من الكرتين بعد التصادم المرن؟



الشكل 7-44 (المسألة 76)

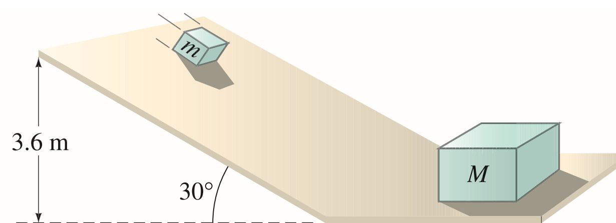
77. نواة ذرّةٍ ساكنةٍ تنحل إشعاعيًّا لتعطي جُسيم ألفا ونواة أصغر. ماذا ستكون سرعة هذه النواة المرتدّة إذا كانت سرعة جُسيم ألفا 3.8×10^5m/s؟ افرض أنّ كتلة النواة المرتدّة تساوي 57 مرّةً من كتلة جُسيم ألفا.



الشكل 7-45 المسألة 78

.78 أُطلقت قطعةً فخّاريّةٌ كتلتها 0.25-kg بزاوية °30 فوق الأفق وبسرعة 25 m/s (الشكل 7-45). وعند وصولها إلى أقصى ارتفاع، قُذفت من الأسفل برصاصةٍ صغيرةٍ كتلتها 15-g تتحرّك رأسيًّا نحو الأعلى وبسرعة 200 m/s. انغرست الرصاصة في القطعة الفخاريّة. (أ) ما الزيادة في الارتفاع الذي ستصل إليه القطعة؟ (ب) ما المسافة الإضافية Δx التي ستسيرها القطعة نتيجة الصدمة؟

.79 قطعةٌ كتلتها $m = 2.20$ kg تنزلق على منحدرٍ يميل بزاوية °30.0 ارتفاعه 3.60 m. عند أسفل المنحدر تصطدم بكتلةٍ $M = 7.00$ kg ساكنة على سطحٍ أفقي (الشكل 7-46) إذا كان التصادم مرنًا ويمكن إهمال الاحتكاك، فحدّد: (أ) سرعتي الكتلتين بعد التصادم. (ب) إلى أي ارتفاع إلى الخلف على السطح المائل سوف تصل الكتلة الصغرى؟

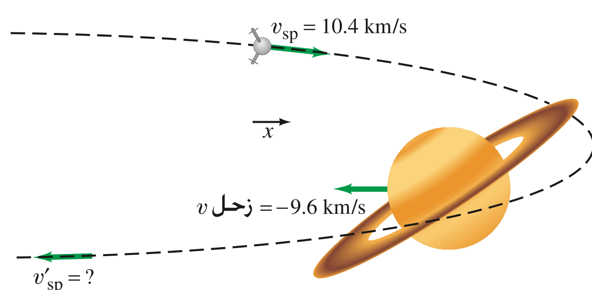


الشكل **7-47** (المسألة 79 و 80)

.80 في المسألة 79 (الشكل 7-46) ما النهاية الكبرى للكتلة m لكي ترتدّ عن الكتلة M وتنزلق إلى أعلى المنحدر، تتوقف، تنزلق مرّةً أخرى أسفل المنحدر لتصطدم بالكتلة M مرة ثانية؟

.81 ظاهرة قذيفة المقلاع الجاذبية.

(الشكل 7-47) يبين الكوكب زحل يتحرك باتجاه x السالب في سرعته المدارية (بالنسبة إلى الشمس) 9.6 km/s. كتلة زحل هي 5.69×10^{26} kg مركبة فضاء كتلتها 825 kg تقترب من زحل عندما تكون بعيدة عن زحل تتحرك باتجاه $+x$ وبسرعة 10.4 km/s. قوة الجاذبيّة من زحل (قوة محافظة)، التي تؤثر في المركبة لتجعلها تلف حول الكوكب (المسار مبين كخط متقطع) لتتجه بعدها بالاتجاه المعاكس. احسب بالتقريب سرعة المركبة بعد أن تكون قد ابتعدت بما فيه الكفاية لتُعتبر حرّةً من قوّة جذب زحل.



الشكل **7-47** (المسألة 81)

إجابات التمارين

أ: نعم إذا كانت سرعة السيارة الرياضية أكبر بثلاث مرات

ب: أكبر.

جـ: (أ) 6.0 m/s (ب) تقريبا صفر (ج) حوالي 24.0 m/s

د: المنحنى سيكون أعرض وأقل ارتفاعا.

هـ: نعم، بـــ 300 مرة.

و: نعم، KE كانت محفوظة.

ز: $x_{CM} = -2.0$ m؛ نعم

ي: يتحرك القارب بالاتجاه المعاكس.



تستطيع أنت أيضًا ممارسة الدوران السريع، إذا استطاعت معدتك تحمّل السرعة الزاوية الكبيرة والتسارع المركزي لبعض ألعاب حديقة التسلية السريعة. وإن لم تستطع، فجرّب الأفعوانة البطيئة أو دولاب الشحذ. إنّ ألعاب (الكرنفال) الدوّارة لها طاقةٌ حركيّةٌ إضافة إلى الزخم الزاوي.

الفصل 8

الحركة الدورانية

حتى الآن، كان اهتمامنا منصبًّا على الحركة الانتقاليّة. وقد ناقشنا الكينماتيكا والديناميكا للحركة الانتقالية (دور القوّة)، وكذلك الطاقة والزخم المرافق لها. وفي هذا الفصل، سنعنى بالحركة الدورانيّة. سنناقش كينماتيكا الحركة الدورانية وبعدها الديناميكا (متضمنة العزم)، كذلك الطاقة الحركيّة الدورانيّة والزخم الدوراني (النظير الدوراني للزخم الخطي). وسنجد مناظرات كثيرة للحركة الانتقاليّة، مما سيجعل دراستنا أكثر سهولة. وفهمنا للعالم من حولنا سيزيد كثيرًا من عجلات الدرّاجة الدوّارة، والأقراص المدمجة إلى ألعاب مدينة الملاهي، وإلى التزلج/ لدوران الأرض، وكذلك إلى جهاز الطرد المركزي، وقد يكون هناك مفاجآت أخرى.

وسندرس بصورةٍ رئيسة دوران **الأجسام الجاسئة** (الصلبة). الجسم الجاسيء هو الجسم ذو الشكل المحدّد، الذي لا يتغيّر، لذلك فالجسيمات المكوّنة له تبقى ثابتةً في أماكنها بالنسبة لبعضها. كلُّ جسمٍ حقيقيٍّ يكون قابلًا للاهتزاز أو التشوّه عندما تؤثّر فيه قوّة. ولكن هذه الآثار تكون عادةً صغيرة. لذا، فإنّ مفهوم الجسم الجاسيء المثالي مفيدٌ جدًّا كتقريب جيد.

1-8 الكميات الزاوية

رأينا في الفصل السابع (البند 7-8) أنّ حركة جسمٍ جاسيء يمكن تحليلها كحركةٍ انتقاليّةٍ لمركز كتلة الجسم، بالإضافة إلى حركة دورانية حول مركزِ كتلته. وقد سبق أن ناقشنا الحركة الانتقاليّة بالتفصيل، لذا سنركّز الآن على الحركة الدورانيّة المجرّدة التي تعني أن نقاط الجسم جميعها تدور في دوائر مثل النقطة p في الدولاب الدائر (الشكل 8-1). ومراكز هذه الدوائر جميعها تقع على خطٍّ واحدٍ يُسمّى "محور الدوران". في (الشكل 8-1) محور الدوران عموديٌّ على الصفحة ويمرّ في النقطة O . كلّ نقطةٍ في جسمٍ دائرٍ حول محورٍ ثابتٍ تتحرّك في دائرة يظهر متقطعاً للنقطة P كما في (الشكل 8-1) مركزها المحور ونصف قطرها r، وهي المسافة من تلك النقطة إلى محور الدوران. الخط المستقيم الذي يرسم من المحور إلى أيّ نقطةٍ يمسح الزاوية θ نفسها في الوقت ذاته.

لبيان الموقع الزاوي لجسمٍ دائرٍ، أو كم يكون قد دار؛ نحدّد الزاوية θ لخطٍّ معيّنٍ في الجسم أحمر في (الشكل 8-1) بالنسبة لخطٍّ مرجعي، كما هو الحال في محور x (الشكل 8-1). نقطة في الجسم مثل P في (الشكل 8-1) تتحرّك زاوية θ عندما تسير المسافة l التي تُقاس على محيط مسارها الدائري. تُقاس الزوايا عادة بالدرجات، ولكن رياضيّات الحركة الدائريّة تكون أسهل بكثيرٍ إذا استعملنا نصف الزاوية **القطرية (radian)** لقياس الزوايا، راديان واحدة (تختصر rad) تعرف بالزاوية التي تقابل قوسًا طوله يساوي نصف القطر. مثلاً، في (الشكل 8-1ب)، النقطة P تبعد مسافة r عن محور الدوران، وتحرّكت مسافة l على قوس الدائرة. يقال إنّ القوس l "يقابل" الزاوية θ. اذا كانت $l = r$، فإنّ θ تساوي بالضبط 1 rad. بالراديان؛ أي زاوية θ تعطى بـ.

$$\theta = \frac{l}{r} \qquad \textbf{(8-1أ)}$$

حيث r نصف قطر الدائرة، و l طول القوس المقابل للزاوية محدّدة بالراديان. إذا كانت $l = r$ فعندها $\theta = 1$ rad الراديان كميّة ليس لها وحدات؛ لأنّها النسبة بين طولين. وعلى الرغم من ذلك نذكر دائمًا rad عندما نعطي زاوية بالراديان، لنتذكّر أنّها ليست درجات. ومن المفيد أحيانًا أن نكتب (المعادلة 8-1أ) بدلالة القوس l:

$$l = r\theta \qquad \textbf{(8-1ب)}$$

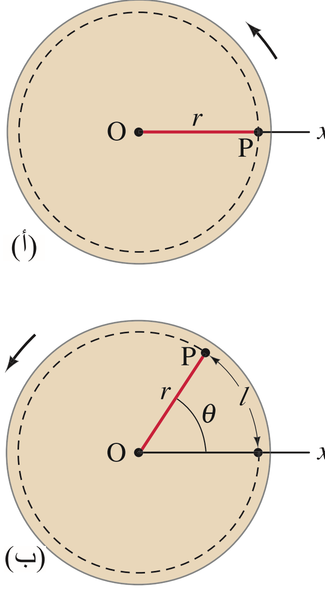
الراديان يمكن ربطها بالدرجات كما يلي: في دائرةٍ كاملةٍ هناك $360°$، وهذا يقابل طول قوسٍ يساوي محيط الدائرة، $l = 2\pi r$. وهكذا في دائرة كاملة: أي $\theta = l/r = 2\pi r/r = 2\pi$ rad

$$360° = 2\pi \text{ rad}$$

وهكذا، فإن راديان واحدة تساوي $360°/2\pi \approx 360°/6.28 \approx 57.3°$

فالجسم الذي يكمل دورة كاملة (rev) يكون قد دار $360°$ أو 2π rad:

$$1 \text{ rev} = 360° = 2\pi \text{ rad}.$$



الشكل 8-1 النظر إلى عجلة يدور عكس اتجاه عقارب الساعة حول محور يمر بمركز الدولاب عند النقطة O (المحور عمودي على الصفحة). تدور كل نقطة مثل P، في مسار دائري؛ l هي المسافة التي تسيرها P عندما يدور الدولاب خلال زاوية θ.

θ بالراديان.

طول القوس = نصف القطر: 1 *rad*

تحويل الدرجات إلى راديان.
1 *rad* ≈ 57.3°

المثال 8-1 عجلة الدّراجة.

عجلة درّاجة يدور 4.50 دورةً.كم زاويةٍ نصف قطرية (راديان) دار؟

النهج: كلّ ما نحتاج إليه هو تحويلٌ مباشرٌ للوحدات باستعمال

$$1 \text{ دورة} = 360° = 2\pi \text{ rad} = 6.28 \text{ rad}$$

الحل:

$$4.50 \text{ دورة} = (4.50 \text{ rev})\left(2\pi \frac{\text{rad}}{\text{rev}}\right) = 9.00\pi \text{ rad} = 28.3 \text{ rad}$$

المثال 8-2 الطيور الجارحة – بالراديان

تستطيع عيون بعض الطيور أن تميز الأشياء التي تقابل زاوية لا تقل عن حوالي 3×10^{-4} rad . (أ) كم درجة تعادل هذه الزاوية؟ (ب) ما حجم الشيء الذي يستطيع الطائر تمييزه عندما يطير على ارتفاع 100 m (الشكل 8-2أ)؟

النهج: لـ (أ) نستخدم العلاقة $360° = 2\pi$ rad. في حين نستخدم لـ (ب) (المعادلة 8 - 1ب)، $l = r\theta$ لنجد طول القوس.

الحـل: (أ) نحوّل 3×10^{-4} rad إلى درجات:

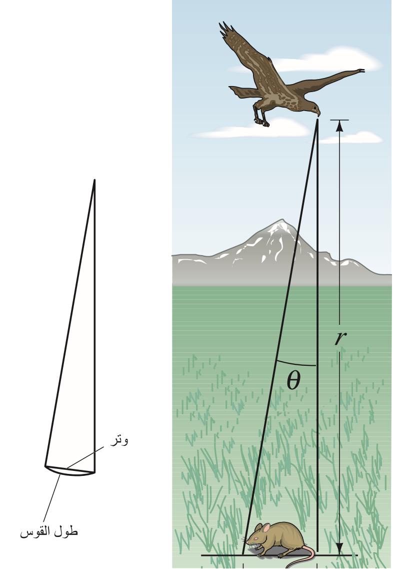
$$(3 \times 10^{-4}\,\text{rad})\left(\frac{360°}{2\pi\,\text{rad}}\right) = 0.017°$$

(ب) نستعمل (المعادلة 8 - 1ب)، $l = r\theta$. للزوايا الصغيرة، القوس l وطول الوتر يكونان متساويان تقريبًا* (الشكل 8 - 2ب). بما أن $r = 100$ m و $\theta = 3 \times 10^{-4}$ rad، نجد

$$l = (100\,\text{m})(3 \times 10^{-4}\,\text{rad}) = 3 \times 10^{-2}\,\text{m} = 3\,\text{cm}$$

لذا يستطيع الطائر تمييز فأر صغير (طوله حوالي 3 cm) من على ارتفاع 100 m؛ هذه قوّة إبصار جيّدة.

ملحوظة: لو أُعطيت الزاوية بالدرجات، كان علينا أولًا تحويلها إلى راديان لعمل هذه الحسابات. تنطبق (المعادلة 8-1أ)فقط إذا حدّدت الزاوية بالراديان. أما الدرجات (أو الدورات) فلا تصلح.



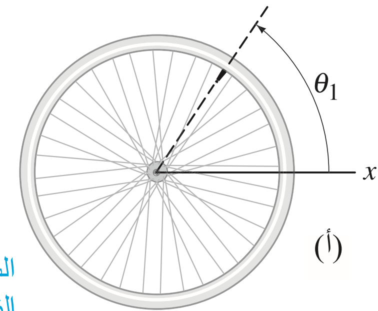
الشكل 8-2 (أ) (المثال 8-2) (ب) للزوايا الصغيرة، طولا القوس والوتر (خط مستقيم) متساويان تقريبا.

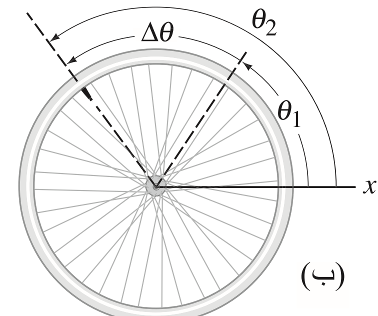
ولوصف الحركة الدورانيّة، نستفيد من الكميّات الزاوية، مثل السرعة الزاوية والتسارع الزاوي. وهذه تُعرف بالتناظر مع الكميّات المقابلة في الحركة الخطيّة، وتختار لتصف الجسم الدوّار كاملًا. لذلك، فهذه الكميّات متساوية لكلّ نقطةٍ في الجسم الدوّار. كما أنّ لكلّ نقطةٍ في الجسم الدوّار كذلك سرعةً انتقاليّةً وتسارع، إلا أنّ هذه الكميّات تختلف من نقطةٍ إلى أخرى في الجسم.

الإزاحة الزاوية (راديان)

عندما يدور جسم، مثل دولاب الدرّاجة (الشكل 8-3)، من موضعٍ ابتدائيٍّ يحدّد بـ θ_1 إلى وضعٍ نهائيٍّ θ_2 فإنّ إزاحته الزاوية هي

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$





الشكل 8-3 عجلة تدور من (آ) الموقع الابتدائي θ_1 إلى (ب) الموقع النهائي θ_2. الإزاحة الزاوية هي $\Delta\theta = \theta_2 - \theta$

السرعة الزاوية

تُعرف **السرعة الزاوية** (يرمز إليها بالرمز اليوناني الصغير ω omega) بالتناظر مع السرعة الانتقاليّة (الخطيّة) التي تمّت مناقشتها في الفصل الثاني. وبدلًا من الإزاحة الخطيّة، نستعمل الإزاحة الزاوية. وهكذا تُعرف **السرعة الزاوية المتوسطة** بـ:

$$\overline{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad \textbf{(8-2أ)}$$

حيث $\Delta\theta$ هي الزاوية التي دارها الجسم خلال الفترة الزمنية Δt. وتُعرف السرعة الزاويّة اللحظية بالزاوية الصغيرة جدًّا $\Delta\theta$ التي يدورها الجسم خلال فترةٍ زمنيّةٍ صغيرة جدًّا Δt.

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad \textbf{(8-2ب)}$$

تُقاس السرعة الزاوية عادةً بالراديان لكلِّ ثانية (rad/s). لاحظ أن النقاط كلّها في جسمٍ جاسيء تدور بالسرعة الزاوية نفسها؛ لأنّ كلّ موضعٍ في الجسم يتحرّك الزاوية نفسها خلال الفترة الزمنية ذاتها. إنّ كلّ جسمٍ كعجلة الدرّاجة في (الشكل 8-3) يمكنه الدوران حول محورٍ ثابتٍ مع اتجاه عقارب الساعة أو عكسها . ويمكن تحديد الاتجاه بإشارة + أو -، كما فعلنا بالحركة الخطيّة، الفصل الثاني، على امتداد $+x$ أو $-x$. الاصطلاح المعتاد هو اختيار الإزاحة $\Delta\theta$ والسرعة ω موجبة إذا كان الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة. أمّا إذا كان الدوران مع اتجاه عقارب الساعة، فإنّ θ تقل، وبذلك تكون $\Delta\theta$، سالبتين**.

* حتى لو بلغت الزاوية حوالي $15°$، فإن الخطأ في إجراء هذا التقريب يكون 1% ويزداد الخطأ بسرعة للزوايا الكبيرة.

** وستناقش الطبيعة الاتجاهيّة للسرعة الزاوية والكميّات الزاوية في (البند 8-9 اختياري).

التسارع الزاوي (يُرمز إليه بالرمز اليوناني α ألفا) يقابل التسارع الخطّي، ويُعرف بالتغيّر في السرعة الزاوية مقسومًا على الزمن اللازم لعمل هذا التغيّر. **التسارع الزاوي المتوسط** يعرف بـ

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (8 - 3أ)$$

حيث ω_1 هي السرعة الزاوية الابتدائيّة، و ω_2 السرعة الزاوية بعد فترةٍ زمنيّة Δt. ويُعرف التسارع الزاوي الخطّي بالطريقة المعتادة نهاية هذه النسبة عندما تقترب Δt من الصفر:

التسارع الزاوي

$$\alpha = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (8 - 3ب)$$

بما أنّ ω هي نفسها للنقاط جميعها للجسم الدائر، فإنّ (المعادلة 8-3) تخبرنا بأنّها ستكون متساويةً للنقاط جميعها أيضًا. وهكذا، فإن ω و α خاصتان للجسم الدوّار ككل. وعند قياس ω بالراديان لكلّ ثانية و t بالثانية، فإن α ستكتب بالراديان لكلّ ثانيةٍ مربّعة $(\mathrm{rad/s^2})$.

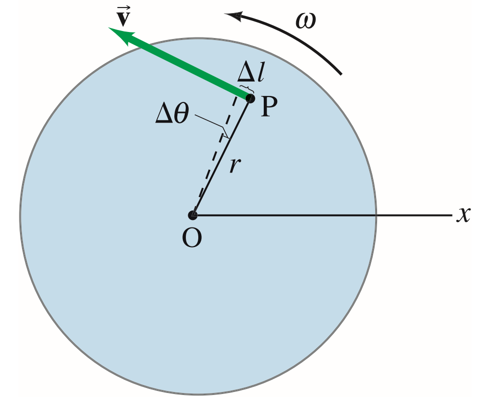
كلُّ نقطةٍ أو جسيمٍ من جسمٍ جاسيءٍ يدور، وعند أيّ لحظة، سيكون لها سرعةٌ خطيّة v وتسارعٌ خطّي a. ويمكننا ربط الكميات الخطّية عند أيّ نقطة a , v بالكميّات الزاوية للجسم الدوار، ω و α. اعتبر نقطة P على بعد r من محور الدوران، كما في (الشكل 8-4) . فإذا كان الجسم يدور بسرعة زاوية ω، فسيكون لكلّ نقطة سرعة خطيّة اتّجاهها باتّجاه المماس لمسارها الدائري. إنّ مقدار هذه السرعة الخطيّة هو $v = \Delta l/\Delta t$. ومن (المعادلة 8-1 ب)، فإنّ التغيّر في زاوية الدوران $\Delta\theta$ (بالراديان) يرتبط بالمسافة الخطية المقطوعة بـ $\Delta l = r\,\Delta\theta$. حيث $v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = r\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

أو

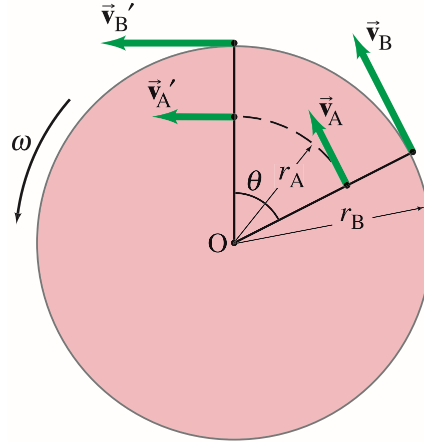
ارتباط السرعتين الدورانية بالخطية.

$$v = r\omega \quad (8 - 4)$$

أخيرًا، وبالرغم من أنّ ω هي نفسها لكلّ نقطةٍ في الجسم الدائر عند أيّ لحظة، فإنّ السرعة الخطيّة v تكون أكبر كلّما ابتعدت النقاط عن محور الدوران (الشكل 8-5). لاحظ أنّ المعادلة 8-4 تنطبق في الحالتين اللحظيّة والمتوسّطة.



الشكل 8-4 نقطة P على دولاب دائر لها سرعة خطية $\vec{v}$ عند أيّ لحظة.



الشكل 8-5 دولاب يدور بانتظام عكس اتجاه عقارب الساعة. نقطتان على الدولاب على بعد r_A و r_B من المركز، لهما السرعة الزاوية ω نفسها لأنهما تقطعان الزاوية θ نفسها في الفترة الزمنية ذاتها. إلّا أنّ لهما سرعتين خطيتين مختلفتين لأنهما تقطعان مسافتين مختلفتين في الفترة الزمنية نفسها. وبما أن $r_B > r_A$، فإن $v_B > v_A$ $(v = r\omega)$

المثال المفاهيمي 8-3 هل الأسد أسرع من الحصان؟

على دوامة الخيل، يجلس طفلٌ على حصانٍ قرب الحافة الخارجيّة، في حين يجلس طفلٌ على أسدٍ في منتصف المسافة عن المركز. (أ) لأي الطفلين السرعة الخطيّة الأكبر؟ (ب) لأي الطفلين السرعة الدورانيّة هي الأكبر؟

الحل: (أ) السرعة *الخطيّة* هي المسافة المقطوعة مقسومةً على الفترة الزمنيّة. في دورةٍ واحدة، يقطع الطفل عند الحافة الخارجيّة مسافةً أطولَ من الطفل القريب من المركز، ولكن الفترة الزمنية لهما متساوية. وعليه، فإنّ الطفل عند الحافة الخارجية على الحصان له سرعةٌ خطيّةٌ أكبر.

(ب) السرعة *الزاوية* هي زاوية الدوران مقسومةً على الفترة الزمنية. في دورةٍ كاملةٍ يدور الطفلان الزاوية نفسها (راديان $2\pi = 360°$) . لذا، فإن للطفلين . السرعة الزاوية ذاتها.

التسارع المماسي

إذا تغيرت السرعة للجسم الدائر، فإنّ الجسم ككل- وكل نقطة منه- له تسارع زاوي. وكلّ نقطه كذلك لها تسارع خطّي اتّجاهه مماس للمسار الدائري لتلك النقطة. نستعمل المعادلة 8-4 $(v = r\omega)$ لنبيّن أنّ التسارع الزاوي α يرتبط بالتسارع الخطّي المماسي $a_{\tan}$ لنقطةٍ ما في الجسم الدائر بـ

$$a_{\tan} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = r\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

أو

$$a_{\tan} = r\alpha \qquad (5 - 8)$$

في هذه المعادلة، r هو نصف قطر الدائرة التي يتحرّك فيها الجُسَيْم، والرمز السفلي "tan" في $a_{\tan}$ "tangential" (المماس).

التسارع الخطّيّ الكلّيّ لنقطةٍ ما، هو الجمع الاتّجاهي لمركبتين:

$$\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{a}}_{\tan} + \vec{\mathbf{a}}_{R}$$

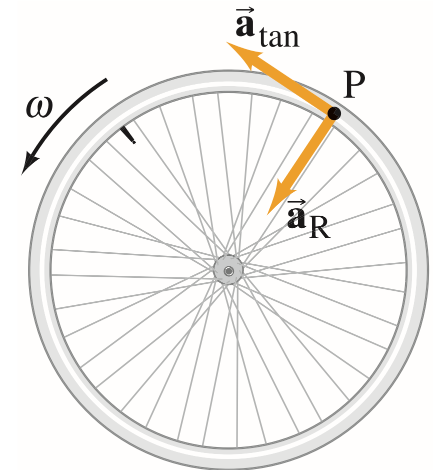
التسارع المركزي (نصف قطري)

حيث المركبة نصف القطريّة*، $\vec{\mathbf{a}}_R$ هو التسارع نصف القطريّ أو المركزيّ "centripetal" واتّجاهه يكون نحو مركز المسار الدائريّ للنقطة. انظر (الشكل 8-6). رأينا في الفصل الخامس (المعادلة 5 - 1) أنّ $a_R = v^2/r$، ويمكننا إعادة كتابة ذلك بدلالة ω باستعمال (المعادلة 8-4):

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(r\omega)^2}{r} = \omega^2 r \qquad (6\text{-}8)$$

وهكذا، فإنّ التسارع المركزي يكون أكبر كلّما ابتعدت عن محور الدوران: الأطفال الأبعد في دوامة الخيل يشعرون بأكبر تسارع.(المعادلات 8 - 4 و 8 - 5 و 8 - 6) تربط بين الكميّات الزاوية التي تصف دوران جسمٍ ما مع الكميات الخطيّة لكلّ نقطةٍ من الجسم. (الجدول 8 - 1) يلخّص هذه العلاقات.

الشكل 8-6 على عجلة دائر تزداد سرعته الزاوية تتزايد، النقطة P لها مركبتان للتسارع الخطي: مماسية ونصف قطرية (مركزية). انظر أيضا الفصل 5.



الجدول 8-1 الكميات الخطية والدورانية

خطية	نوع	دورانية	العلاقة
x	إزاحة	θ	$x = r\theta$
v	سرعة	ω	$v = r\omega$
$a_{\tan}$	تسارع	α	$a_{\tan} = r\alpha$

* "نصف قطري" يعني على امتداد نصف القطر: أي نحو المركز أو المحور أو بعيدا عنهما.

المثال 8-4 السرعات والتسارعات الزاوية والخطيّة

دوّامة خيلٍ ساكنةٍ ابتدائيًّا. عند $t = 0$ تعطى تسارعًا زاويًّا $\alpha = 0.060\ \text{rad/s}^2$، وهذا يزيد السرعة الزاوية لمدة 8.0 s. عند $t = 8.0$ s احسب الكميات التالية: (أ) السرعة الزاوية للدوامة. (ب) السرعة الخطية لطفل (الشكل 8-7أ) عند 2.5 m من المركز، النقطة P من (الشكل 8-7ب). (جـ) التسارع المماسي (الخطّي) للطفل. (د) التسارع المركزي للطفل. (هـ) التسارع الخطّيّ الكلّيّ للطفل.

النهج: التسارع الزاوي α ثابت، لذلك يمكننا استخدام (المعادلة 8 - 13أ) لإيجاد ω بعد زمن $t = 8.0\ \text{s}$. بهذه ω والتسارع المعطى α، نحدّد الكميّات الأخرى باستعمال العلاقات التي طوّرناها حديثًا، (المعادلات 8 - 4، 8 - 5، 8 - 6).

الحل (أ) (المعادلة 8-13أ) تخبرنا

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t}$$

وأُعطينا أن $\omega_1 = 0$ و $\Delta t = 8.0\ \text{s}, \bar{\alpha} = 0.060\ \text{rad/s}^2$

نحل لإيجاد ω_2 فنحصل:

$$\begin{aligned}\omega_2 &= \omega_1 + \bar{\alpha}\,\Delta t \\ &= 0 + (0.060\ \text{rad/s}^2)(8.0\ \text{s}) = 0.48\ \text{rad/s}\end{aligned}$$

تسارعت الدوّامة من s خلال الفترة 8.0 s من $\omega_1 = 0$ إلى $\omega_2 = 0.48\ \text{rad/s}$.

(ب) السرعة الخطيّة للطفل؛ حيث $r = 2.5\ \text{m}$ عند $t = 8.0\ \text{s}$ يمكن حسابها باستعمال (المعادلة 8-4):

$$v = r\omega = (2.5\ \text{m})(0.48\ \text{rad/s}) = 1.2\ \text{m/s}$$

لاحظ أنّ الـ (rad) أُسقطت هنا لأنّها كميّة لا أبعاد لها (فقط للتذكير) – إنّها نسبةٌ بين مسافتين، (المعادلة 8 - 1ب) .

(جـ) تسارع الطفل المماسي يُعطى وفق (المعادلة 8-5) :

$$a_{\tan} = r\alpha = (2.5\ \text{m})(0.060\ \text{rad/s}^2) = 0.15\ \text{m/s}^2$$

ويبقى ثابتًا خلال فترة التسارع 8.0-s.

(د) التسارع المركزي للطفل عند $t = 8.0\ \text{s}$ يُعطى بالمعادلة 8-6:

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \frac{(1.2\ \text{m/s})^2}{(2.5\ \text{m})} = 0.58\ \text{m/s}^2$$

(هـ) مركبتا التسارع الخطيّ اللتان حسبتا في الفرعين (جـ) و (د) متعامدتان. وهكذا فمقدار التسارع الخطّيّ عند $t = 8.0$ s هو

$$\begin{aligned}a &= \sqrt{a_{\tan}^2 + a_R^2} \\ &= \sqrt{(0.15\ \text{m/s}^2)^2 + (0.58\ \text{m/s}^2)^2} = 0.60\ \text{m/s}^2\end{aligned}$$

واتجاهه (الشكل 8-7ب) هو :

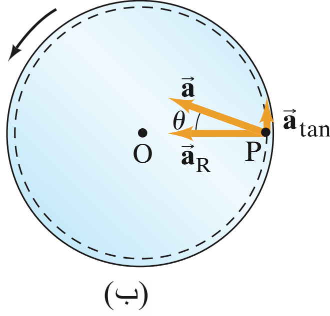
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a_{\tan}}{a_R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.15\ \text{m/s}^2}{0.58\ \text{m/s}^2}\right) = 0.25\ \text{rad}$$

أي $\theta \approx 15°$

ملحوظة: التسارع الخطّيّ معظمه مركزي، يحافظ على الطفل متحركًا في دائرةٍ مع الدوّامة. والمركبة المماسية التي تسرّع الحركة أقل.



(أ)



(ب)

الشكل 8-7 (المثال 8-4) متجه التسارع الكلي $\vec{a} = \vec{a}_{\tan} + \vec{a}_R$, $t = 8.0$ s عند اللحظة

يمكننا ربط السرعة الزاوية ω بتردّد الدوران f. التردّد هو عدد الدورات الكاملة (rev) في الثانية، كما رأينا في (الفصل 5) . دورة واحدة (دولاب مثلا) تقابل زاوية 2π rad، وهذا $1 \text{ rev/s} = 2\pi \text{ rad/s}$. وبالتالي، وعلى نحوٍ عام، فإنّ التردّد f يرتبط بالسرعة الزاوية ω بـ

التردد

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

أو

$$\omega = 2\pi f \qquad \textbf{(7-8)}$$

وحدة التردّد، دوراتٌ لكلّ ثانية (rev/s)، تُعطى اسمًا خاصًّا هو هيرتز (Hz)؛ أي أنّ

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ rev/s}$$

لاحظ أنّ "الدورة" ليست وحدةً في الواقع، ولذلك يمكننا كتابة $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.

الزمن الدوري

الزمن اللازم لعمل دورةٍ كاملةٍ يُسمّى **الزمن الدوري** T ويرتبط بالتردّد؛ حيث

$$T = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(8-8)}$$

إذا دار جُسيمٌ بتردّدٍ ثلاث دوراتٍ في الثانية، فإنّ الزمن لكلّ دورةٍ هو $\frac{1}{3}$s.

التمرين أ: في (المثال 8-4) ، وجدنا أنّ الدوّامة، بعد مرور 8.0 s تدور بسرعةٍ زاويةٍ $\omega = 0.48$ rad/s، وتستمرُّ بعمل ذلك بعد $t = 8.0$ s لأنّ التسارع يتوقّف. ما التردّد والزمن الدوريّ للدوّامة؟

تطبيق الفيزياء

القرص الصلب وسرعة الـ bit

المثال 8-5 القرص الصلب.

تدور أسطوانة القرص الصلب في الحاسوب بمعدل 7200 rpm (دورة/دقيقة). (أ) ما السرعة الزاوية للأسطوانة؟ (ب) إذا كان الرأس القارئ للقرص يقع على بعد 3.00 cm من محور الدوران، فما السرعة الخطيّة للنقطة على القرص تحت الرأس مباشرة؟ (جـ) إذا كانت ال bit الواحدة تحتاج إلى 0.50 μm طول على امتداد اتجاه الحركة، فكم bit في الثانية يستطيع الرأس الكاتب أن يكتب إذا كان على بعد 3.00 cm من المحور؟

النهج: نستعمل التردّد المُعطى f لحساب السرعة الزاوية ω للأسطوانة ومن ثَمّ السرعة الخطيّة لنقطةٍ على الأسطوانة ($v = r\omega$). وبحسب معدّل الـ bit بقسمة السرعة الخطيّة على طول bit الواحدة (الزمن / المسافة = v)

الحل: (أ) نجد أولا التردد بـ $f = 7200$ rev/min:

$$f = \frac{(7200 \text{ rev/min})}{(60 \text{ s/min})} = 120 \text{ rev/s} = 120 \text{ Hz}$$

ثم السرعة الزاوية تساوي

$$\omega = 2\pi f = 754 \text{ rad/s}$$

(ب) السرعة الخطيّة لنقطةٍ على بعد 3.00 cm من المحور تُعطى وفق (المعادلة 8-4):

$$v = r\omega = (3.00 \times 10^{-2} \text{ m})(754 \text{ rad/s}) = 22.6 \text{ m/s}$$

(جـ) كلّ bit تحتاج إلى 0.50×10^{-6} m. لذلك عند سرعة 22.6 m/s، فإنّ عدد الـ bit التي تعبر الرأس في الثانية هو

$$\frac{22.6 \text{ m/s}}{0.50 \times 10^{-6} \text{ m/bit}} = 45 \times 10^{6} \quad \text{bits per second}$$

أو 45 megabits /s (Mbps) .

2-8 التسارع الزاوي الثابت

في الفصل الثاني، تمّ اشتقاق معادلات الكينماتيكا (المعادلات 2-11) التي تربط التسارع، والسرعة، والمسافة والزمن للحالة الخاصّة التي يكون فيها التسارع الخطّيّ منتظمًا. وقد تمّ اشتقاق هذه المعادلات من تعريف السرعة الخطيّة والتسارع بفرض أن التسارع ثابت. تعريفات السرعة الزاوية والتسارع الزاوي هي كما في مثيلاتها الخطيّة، ماعدا أنّ θ حلّت محلّ الإزاحة الخطيّة x، ω حلّت محلّ v و α محلّ a. لذلك، فالمعادلات الزاوية **للتسارع الزاوي الثابت** ستكون مشابهةً (المعادلات 2-11) مع استبدال x بـ θ، v بـ ω، a بـ α، ويمكن اشتقاقها بالطريقة نفسها. وهي ملخّصة هنا، مقابل المعادلات الخطيّة (وقد اخترنا $\theta_0 = 0$ و $x_0 = 0$ عن زمن البدء $t = 0$).

			خطي	زاوي
معادلات كينماتيكا	(8-9أ)	[ثابت α, a]	$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$
الحركة الدورانية لتسارع	(8-9ب)	[ثابت α, a]	$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
زاوي ثابت	(8-9جـ)	[ثابت α, a]	$v^2 = v_0^2 + 2ax$	$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta$
$(x_0 = 0, \theta_0 = 0)$	(8-9د)	[ثابت α, a]	$\bar{v} = \dfrac{v + v_0}{2}$	$\bar{\omega} = \dfrac{\omega + \omega_0}{2}$

لاحظ أنّ ω_0 تمثّل السرعة الزاوية عند $t = 0$، أما θ و ω، فتمثّلان الموقع الزاوي والسرعة الزاوية على الترتيب، عند زمن t. وبما أنّ التسارع الزاوي ثابت، إذن $\alpha = \bar{\alpha}$.

المثال 8-6 تسارع الطارد المركزي (النابذة)

يتسارع الدوّار في الطارد المركزيّ من السكون إلى 20,000 دورةٍ في الدقيقة خلال 30 s. (أ) ما تسارعه الزاوي المتوسط؟ (ب) كم عدد الدورات التي دارها الدوّار خلال فترة تسارعه، بفرض أنّ التسارع الزاوي ثابت؟

النهج: لتحديد $\bar{\alpha} = \Delta\omega/\Delta t$، نحتاج إلى السرعتين الزاويتين الابتدائيّة والنهائيّة. للجزء (ب): نستعمل (المعادلة 8-9) (تذكّر أنّ الدورة الواحدة تكافئ $\theta = 2\pi$ rad).

الحـــل: (أ) السرعة الزاوية الابتدائيّة هي $\omega = 0$. أمّا السرعة الزاوية النهائية فهي

$$\omega = 2\pi f = (2\pi \text{ rad/rev})\frac{(20{,}000 \text{ rev/min})}{(60 \text{ s/min})} = 2100 \text{ rad/s}$$

وبالتالي، بما أنّ $\bar{\alpha} = \Delta\omega/\Delta t$ و $\Delta t = 30$ s

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} = \frac{2100 \text{ rad/s} - 0}{30 \text{ s}} = 70 \text{ rad/s}^2$$

أي أنّه في كلّ ثانيةٍ تزداد سرعة الدوّار بـ 70 rad/s أو $(70/2\pi) = 11$ دورةً في الثانية.

(ب) لإيجاد θ: يمكننا استعمال (المعادلة 8-9ب، أو 8-9جـ)، أو كليهما لاختيار الإجابة. الأولى تعطي

$$\theta = 0 + \tfrac{1}{2}(70 \text{ rad/s}^2)(30 \text{ s})^2 = 3.15 \times 10^4 \text{ rad}$$

ولإيجاد عدد الدورات الكلّيّ، نقسم على 2π rad/rev للحصول على

$$\frac{3.15 \times 10^4 \text{ rad}}{2\pi \text{ rad/rev}} = 5.0 \times 10^3 \text{ rev}$$

ملحوظة: دعنا نحسب θ باستعمال المعادلة 8-9ج:

$$\theta = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\alpha} = \frac{(2100 \text{ rad/s})^2 - 0}{2(70 \text{ rad/s}^2)} = 3.15 \times 10^4 \text{ rad}$$

التي تختبر نتيجتنا تمامًا.

3-8 حركة الدحرجة (من غير انزلاق)

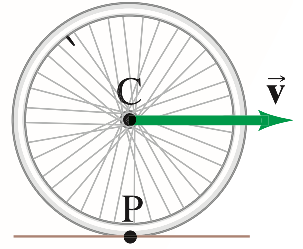
حركة دحرجة كرةٍ أو عجلةٍ هي حركةٌ مألوفةٌ في حياتنا اليومية: كرةٌ تتدحرج على الأرض، أو دواليب، أو إطارات سيّارة، أو درّاجة على الرصيف. الدحرجة من غير انزلاق تمّ تحليلها، وتعتمد على الاحتكاك السكونيّ بين الجسم المتدحرج والأرض. ونقول الاحتكاك سكوني؛ لأنّ نقطة تماس الجسم المتدحرج بالأرض ساكنةٌ عند كلّ لحظة.

إنّ الدحرجة من غير انزلاق تتضمّن الدوران والانتقال معًا. لذا، فهناك علاقةٌ مبسّطةٌ بين سرعة المحور الخطيّة والسرعة الزاوية ω للدولاب الدوّار أو الكرة. في الواقع، $v = r\omega$ (حيث r هو نصف القطر) كما نبيّن الآن . يبين (الشكل 8-8أ) دولابًا يتدحرج إلى اليمين من غير انزلاق. عند اللحظة المبيّنة، النقطة P على الدولاب في حالة تماسٍ مع الأرض ولحظيًّا في حالة سكون. سرعة المحور C في منتصف الدولاب هي $\vec{\mathbf{v}}$. في (الشكل 8-8ب) وضعنا أنفسنا في الإطار المرجعيّ للدولاب؛ أي أننا نتحرك نحو اليمين بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$ بالنسبة إلى الأرض. يكون المحور C في هذا الإطار المرجعيّ ساكنًا، أمّا الأرض والنقطة P فتتحركان إلى اليسار بسرعة $-\vec{\mathbf{v}}$ كما هو واضح. وهنا نرى دورانًا مجرّدًا. لذلك، نستطيع استعمال (المعادلة 8-4) للحصول على $v = r\omega$، حيث r نصف قطر الدولاب . هذه نفسها v (الشكل 8-8أ) .

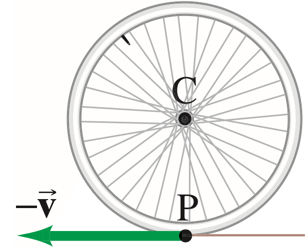
ولذلك نرى أنّ السرعة الخطيّة v للمحور نسبةً إلى الأرض ترتبط بالسرعة الزاوية ω بـ

$$v = r\omega \qquad [\text{دحرجة من غير انزلاق}]$$

هذه العلاقة صحيحة فقط إذا لم يكن هناك انزلاق.



(أ)



(ب)

الشكل 8-8 (أ) دولاب يتدحرج نحو اليمين مركزه C يتحرك بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$. النقطة P ساكنة في هذه اللحظة. (ب) الدولاب نفسه كما يبدو من إطار مرجعي فيه محور الدولاب C في حالة سكون؛ أي أننا نتحرك نحو اليمين بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$ بالنسبة إلى الأرض. النقطة P التي كانت ساكنة في(أ) هنا في (ب) تتحرك نحو اليسار بسرعة $-\vec{\mathbf{v}}$ كما هو مبين (انظر أيضا الجزء 3-8 عن السرعة النسبية).

المثال 7-8 الدرّاجة

تتباطأ درّاجة بانتظام من $v_0 = 8.40\ \text{m/s}$ إلى السكون عبر مسافة 115 m، (الشكل 8-9). كلّ دولاب قطره 68.0 cm. احسب: (أ) السرعة الزاوية للدولابين عند اللحظة $t = 0$. (ب) عدد الدورات الكلّيّ التي يدورها كلُّ دولابٍ قُبيل التوقف. (ج) التسارع الزاوي للدولاب. (د) الوقت اللازم لتوقف الدولاب.

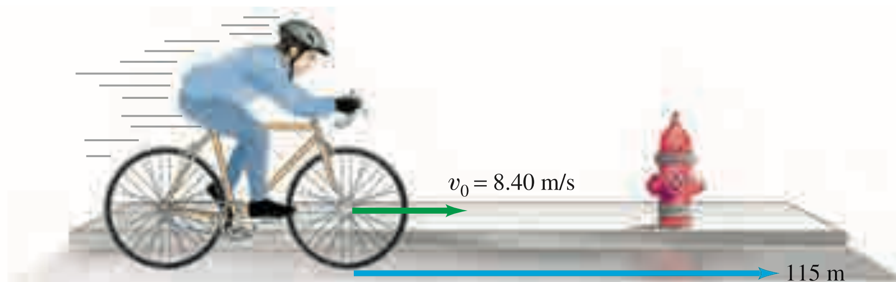
النهج: نفرض أنّ دواليب الدرّاجة تتدحرج من غير انزلاق، وأنّ الإطارات في تماسٍّ تامٍّ مع الأرض. سرعة الدرّاجة v والسرعة الزاوية للعجلات ω ترتبط بالعلاقة $v = r\omega$. ولأنّ الدرّاجة تتباطأ بانتظام، فإنّ التسارع الزاوي يكون ثابتًا. ويمكننا استعمال (المعادلات 8-9) .

الحل: (أ) السرعة الزاوية الابتدائية للدولاب الذي نصف قطره 34.0 cm تساوي

$$\omega_0 = \frac{v_0}{r} = \frac{8.40\ \text{m/s}}{0.340\ \text{m}} = 24.7\ \text{rad/s}$$

(ب) للوصول إلى مرحلة التوقف؛ تمرّ الدرّاجة على 115 m من الأرض.محيط الدولاب هو $2\pi r = (2\pi)(0.340\ \text{m})$. وهكذا، فإنّ عدد الدورات التي يعملها الدولاب للوصول إلى التوقّف هو

$$\frac{115\ \text{m}}{2\pi r} = \frac{115\ \text{m}}{(2\pi)(0.340\ \text{m})} = 53.8\ \text{rev}$$



الدرّاجة كما تبدو لناظرٍ على الأرض عند $t = 0$

الشكل 9-8 (المثال 8-7)

(جـ) التسارع الزاوي للدولاب يمكن الحصول عليه من المعادلة 8-9ج حيث نضع $\omega = 0$ و $\omega_0 = 24.7\ \text{rad/s}$.
ولأنّ كل دورةٍ تقابل 2π راديان، فإنّ $\theta = 2\pi\ \text{rad/rev} \times 53.8\ \text{rev}\ (= 338\ \text{rad})$، و

$$\alpha = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\theta} = \frac{0 - (24.7\ \text{rad/s})^2}{2(2\pi\ \text{rad/rev})(53.8\ \text{rev})} = -0.902\ \text{rad/s}^2$$

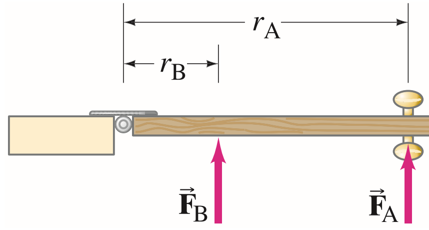
(د) (المعادلة 8 - 9 أ أو ب) تسمح لنا بالحلّ للحصول على الزمن، لكن الأولى أسهل:

$$t = \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} = \frac{0 - 24.7\ \text{rad/s}}{-0.902\ \text{rad/s}^2} = 27.4\ \text{s}$$

ملحوظة: عندما يكمل دولاب الدرّاجة دورةً واحدة، تتقدّم الدرّاجة مسافةً خطيَّةً تساوي المحيط الخارجي $(2\pi r)$ للإطار، ما دام لا يوجد هناك انزلاق.

4-8 العزم

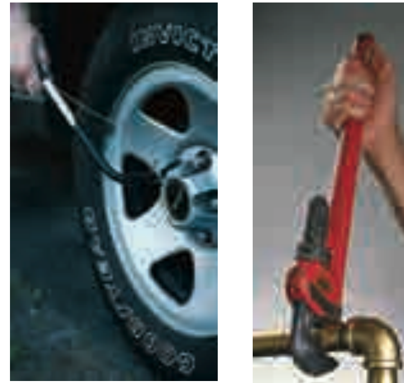
ناقشنا حتى الآن كينماتيكا الحركة الدورانيّة- وصف الحركة الدورانيّة بدلالة الزاوية، السرعة الزاوية، والتسارع الزاوي. والآن، سوف نناقش الديناميكا أو مسبّبات الحركة الدورانيّة. وإضافةً إلى ما وجدناه من متشابهاتٍ بين الحركتين: الخطيّة والدورانيّة من حيث وصف الحركة، فإنّه يوجد هنالك متشابهاتٌ في الديناميكا أيضًا.



الشكل 8-10 تطبيق القوة نفسها، ولكن بذراع رافعة مختلف، r_B و r_A. فإذا كانت $r_A = 3r_B$، للحصول على الأثر نفسه (التسارع الزاوي)، يجب أن تكون F_B ثلاثة أمثال F_A، أو $F_A = \frac{1}{3}F_B$.

لجعل جسم يبدأ بالدوران حول محورٍ ما؛ فإنّنا وبوضوحٍ نحتاج إلى قوّة. لكنَّ اتجاه هذه القوّة وأين تؤثّر مهمٌّ أيضًا. خذ على سبيل المثال وضعًا عاديًّا، كالمنظر العلوي للباب المبيّن في الشكل 8-10. إذا أثّرت بقوّة $\vec{F}_A$ في الباب كما هو مبيّن، فستجد أنّه كلّما كان المقدار، F_A، أكبر، فتح الباب أسرع. ولكن لو أثّرت. بمقدار القوّة نفسها عند نقطة أخرى، $\vec{F}_B$ مثلا (الشكل 8-10) فإنّ الباب لا يفتح بهذه السرعة. إنّ أثر القوّة يصبح أقل: أين تؤثر القوّة؟ بالإضافة إلى مقدارها واتجاهها فإنّها تؤثّر في سرعة فتح الباب. في الواقع، إذا أثّرت هذه القوة في الباب فقط، فإنّ التسارع الزاوي للباب يتناسب طرديًّا، ليس مع مقدار القوة فقط، بل يتناسب طرديًّا أيضًا مع المسافة العموديّة من محور الدوران إلى الخطّ الذي تؤثّر القوّة في امتداده. هذه المسافة تُسمّى **ذراع الرافعة**، أو **ذراع العزم**، للقوّة، ويرمز إليهما r_A و r_B للقوّتين في (الشكل 8-10) . وهكذا، إذا كانت r_A في (الشكل 8-10) ثلاثة أمثال r_B، فإنّ التسارع الزاوي سيكون أكبر بثلاث مرات، بفرض أن مقدار القوّتين هو نفسه. وهناك طريقةٌ أخرى هي: إذا كان $r_A = 3r_B$، فإن F_B يجب أن تكون ثلاثة أمثال F_A لإعطاء التسارع الزاوي نفسه. (الشكل 8-11 يبني مثالين لأداتين طول ذراع العزم فيهما فاعل جدًّا).

ذراع الرافعة



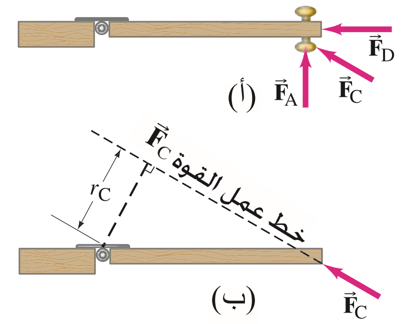
الشكل 8-11 (أ) يستطيع السّباك التأثير بعزمٍ أكبر عند استعمال مفتاح ذي ذراعٍ أطول. (ب) وكذلك مفتاح الدولاب يمكن أن يكون له ذراع عزمٍ أطول.

مقدار عزم الدوران

إذن، فالتسارع الزاوي يتناسب مع حاصل ضرب القوة بذراع العزم. يُدعى الناتج بعزم القوّة حول المحور، أو، بصورةٍ أشمل يُدعى **عزم الدوران**، ويُمثَّل بالرمز τ (حرف لاتيني صغير *tau*). وهكذا، التسارع الزاوي a لجسم ما يتناسب طرديًّا مع عزم الدوران المحصل τ:

$$\alpha \propto \tau$$

ونرى أنّ عزم الدوران هو الذي يعطي التسارع الزاوي. إنّ هذا هو الشبيه الزاوي لقانون نيوتن الثاني في الحركة الخطية، $a \propto F$.



الشكل 12-8 (أ) قوى تؤثر بزوايا مختلفة في يد الباب.

(ب) ذراع القوة يعرف بالمسافة العمودية من محور الدوران (محور التعليق) إلى خط عمل القوة.

عرفنا ذراع القوّة بالمسافة العموديّة من محور الدوران إلى خطّ عمل القوّة؛ أي المسافة العموديّة على محور الدوران والخطّ الوهميّ المرسوم على امتداد اتّجاه القوّة. إنّنا نعمل ذلك لنأخذ بالحسبان أثر القوى التي تعمل بزاوية، مثل القوّة $\vec{F}_C$ في (الشكل 8-12) ، وسيكون أثرها أقلَّ من قوّةٍ تؤثّر عموديًّا في الباب مثل $\vec{F}_A$ (الشكل 8-12 أ). وإذا دفعت بقوّةٍ موجّهةٍ إلى نقطة التعليق (محور الدوران) كما في القوّة $\vec{F}_D$، فإنّ الباب لا يدور أبدًا.

يمكن إيجاد ذراع القوّة لقوّةٍ مثل $\vec{F}_C$ عن طريق رسم خطٍّ على امتداد اتّجاه القوة $\vec{F}_C$ (هذا هو "خط عمل $\vec{F}_C$"). ثمّ نرسم خطًّا عموديًّا على خطّ العمل، يصل إلى محور الدوران وعموديًّا عليه. طول هذا الخط الثاني هو ذراع القوّة ويرمز إليه بـ r_C في (الشكل 8-12ب). ذراع القوّة عموديٌّ على خطّ عمل القوّة من جهة، ومن جهةٍ أخرى عموديٌّ على محور الدوران.

إنّ مقدار عزم الدوران المرافق للقوّة $\vec{F}_C$ هو $r_C F_C$. هذا ذراع القوّة القصير r_C وعزم الدوران الناجم عنه والمرافق للقوّة $\vec{F}_C$ يتفق مع الواقع بأنّ $\vec{F}_C$ أقلّ فاعليةً في تسارع الباب من $\vec{F}_A$. وعند تعريف ذراع القوّة بهذه الطريقة، فإنّ التجربة تبيّن أنّ العلاقة $\alpha \propto \tau$ تنطبق بصورةٍ عامّة. لاحظ في (الشكل 8-12) أنّ خطّ عمل القوّة $\vec{F}_D$ يمرّ بنقطة التعليق. ولذلك، فإنّ ذراع القوّة صفر. ومن ثَمَّ فإنّ عزم الدوران المرافق للقوّة $\vec{F}_D$ يساوي صفرًا.

وبالتالي، فإنّ عزم الدوران المرافق للقوّة $\vec{F}_D$ يساوي صفراً. وهذا لا يسبّب أيّ تسارعٍ زاوي، وهو ما ينسجم مع مشاهدتنا في الحياة اليومية.

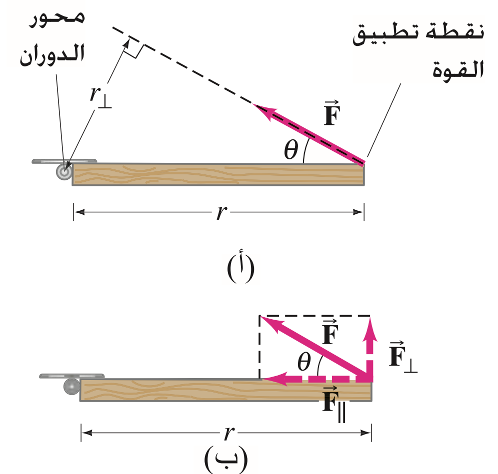
وعلى نحوٍ عام، يمكننا كتابة مقدار عزم الدوران حول محور معيّن على النحو التالي:

$$\tau = r_\perp F \qquad \text{(8-10أ)}$$

حيث $r_\perp$ هو ذراع القوة والإشارة العموديّة (⊥) تذكّرنا أنّ علينا استعمال المسافة من محور الدوران العموديّة على خطّ عمل القوّة (الشكل 8-13أ).

الشكل 8-13:

عزم الدوران $= r_\perp F = rF_\perp$



وطريقة مكافئة لإيجاد عزم الدوران المرافق القوّة هي تحليل القوّة إلى مركبتين. موازية وعموديّة على الخطّ الواصل بين المحور ونقطة تأثير القوّة، (الشكل 8-13ب).

المركبة $F_\parallel$ لا تؤثّر بأيّ عزمٍ لأنّها باتجاه محور الدوران (ذراع عزمها يساوي صفرًا). ولهذا يكون عزم الدوران مساويًا لـ $F_\perp$ مضروبةً في المسافة r من المحور إلى نقطة تأثير القوّة:

$$\tau = rF_\perp \qquad \text{(8-10ب)}$$

يمكن أن نرى أنّ هذا يعطي النتيجة نفسها كما في (الشكل 8-10 أ) من العلاقات $F_\perp = F\sin\theta$ و $r_\perp = r\sin\theta$. [لاحظ أنّ θ هي الزاوية بين اتّجاهي $\vec{F}$ و r (الخطّ القطريّ من المحور إلى نقطة تأثير القوّة $\vec{F}$)]. وهكذا

$$\tau = rF\sin\theta \qquad \text{(8-10ج)}$$

تعريف عزم القوة

في أيٍّ من الحالتين.يمكننا استعمال أيٍّ من (المعادلات 8-10) ، حسب أيّها أبسط. بما أنّ عزم الدوران هو حاصل ضرب مسافةٍ في قوّة، لذا فإنّه يُقاس بوحدات m·N في النظام الدولي*

SI ,cm.dyne في نظام cgs و ft.1b في النظام الإنجليزي.

* لاحظ أنّ وحدات عزم الدوران نفسها وحدات الطاقة. نكتب وحدات العزم m.N لتمييزها عن وحدات الطاقة m·N؛ لأنّ الكميتين مختلفتان كثيرًا. هناك فرقٌ واضح، وهو أنّ الطاقة كميّة قياسيّة، ولكنّ عزم الدوران كميّةٌ متجهةٌ. الاسم الخاص "جول" (=1 J 1N.m) يُستعمل فقط للطاقة (وللشغل)، ولكن ليس للعزم أبدًا.

المثال 8-8 عزم دوران العضلة ذات الرأسين

تؤثّر العضلة ذات الرأسين بقوّةٍ في الذراع السفلي، المنثني في (الشكل 8-14أ، ب). احسب عزم الدوران حول محور الدوران خلال مفصل الكوع في الحالتين، بفرض أنّ العضلة مثبتةٌ على بعد 5.0 cm من الكوع كما هو مبين.

النهج: القوّة معطاةٌ، وكذلك ذراع القوّة في (أ) مُعطى أيضًا. في (ب) علينا أن نأخذ بالحسبان الزاوية للحصول على ذراع القوّة.

الحل: (أ) $F = 700\ \text{N}$ و $r_\perp = 0.050\ \text{m}$، لذلك

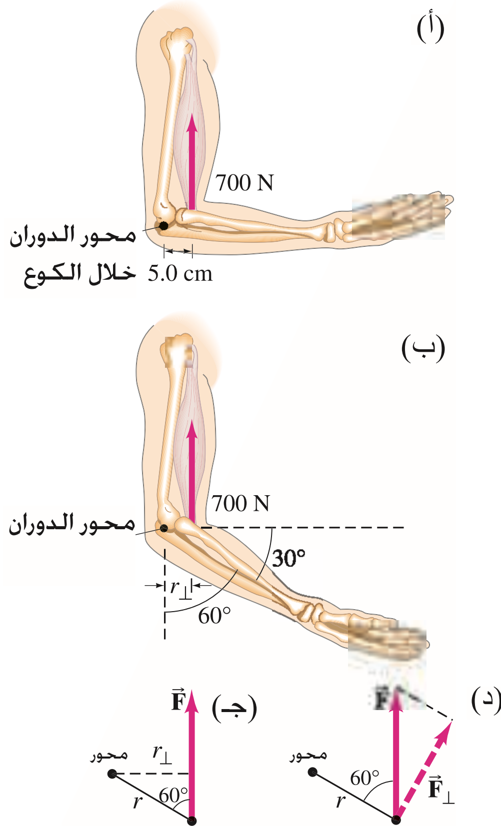
$$\tau = r_\perp F = (0.050\ \text{m})(700\ \text{N}) = 35\ \text{m}\cdot\text{N}$$

(ب) بما أنّ الذراع يصنع زاوية تحت الأفق، فإنّ ذراع القوّة أقصر (الشكل 8-14جـ) من الذراع في الجزء (أ): $r_\perp = (0.050\ \text{m})(\sin 60^\circ)$ حيث $\theta = 60^\circ$ هي الزاوية بين $\vec{\mathbf{F}}$ و r. F لا زالت 700 N لذلك

$$\tau = (0.050\ \text{m})(0.866)(700\ \text{N}) = 30\ \text{m}\cdot\text{N}$$

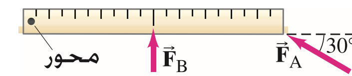
يستطيع الذراع التأثير بعزم دوران أقلّ عند هذه الزاوية منه عندما تكون الزاوية 90°. ولهذا فإنّ آلات الوزن في صالات الرياضة تصمّم عادةً لتأخذ هذا التغيّر بالحسبان.

ملحوظة: في (ب) يمكننا بدلًا من ذلك استعمال $\tau = rF_\perp$. كما هو مبيّن في (الشكل 8-14د)، $F_\perp = F\sin 60^\circ$. لذلك $\tau = rF_\perp = rF\sin\theta = (0.050\ \text{m})(700\ \text{N})(0.866)$ لتعطي النتيجة نفسها.



الشكل **8-14** (التمرين 8-8)

التمرين ب: قوتان ($F_B = 20\ \text{N}$ و $F_A = 30\ \text{N}$) تؤثّران في مسطرةٍ متريّةٍ يمكنها الدوران حول نهايتها اليسرى، (الشكل 8-15) . القوّة $\vec{\mathbf{F}}_B$ تؤثّر عموديًّا عند المنتصف. أيّ القوّتين تولّد عزم دورانٍ أكبر؟



الشكل **8-15** التمرين ب

عندما يؤثّر في الجسم أكثر من عزم دورانٍ واحد، فإنّ التسارع الزاوي α يتناسب مع عزم الدوران المحصّل. إذا كانت كلّ عزوم الدوران تؤدّي بالجسم إلى أن يدور بالاتجاه نفسه حول محور ودوران ثابتين، فإن عزم الدوران المحصّل هو مجموع هذه العزوم. ولكن لو كان هناك عزمٌ يعمل على إدارة الجسم باتجاه، في حين يعمل عزمٌ آخر على إدارته بالاتجاه المعاكس كما في (الشكل 8-16) فإنّ العزم المحصّل يكون الفرق بين العزمين. ونستعمل عادةً إشارةً موجبةً للعزم الذي يدير الجسم بعكس اتجاه عقارب الساعة، وإشارة سالبة للعزوم التي تعمل لتدير الجسم مع اتجاه عقارب الساعة.

المثال 8-9 عزم دوران عجلة مركبة

دولابان رقيقان بشكل قرصين، نصفا قطريهما $r_A = 30\ \text{cm}$، و $r_B = 50\ \text{cm}$ ثُبّتا معًا على محورٍ يمرُّ من منتصفهما كما في (الشكل 8-16) .

احسب عزم الدوران المحصل على هذا الدولاب المركب الناتج من القوّتين المبيّنتين، مقدار كلٍّ منهما 50 N.

النهج: تعمل القوّة $\vec{\mathbf{F}}_A$ على إدارة النظام بعكس اتجاه عقارب الساعة، ولكن القوّة $\vec{\mathbf{F}}_B$ تعمل على إدارته مع اتجاه عقارب الساعة، أي أنّ القوتين تعملان باتجاهين متعاكسين. علينا أن نختار اتجاهًا موجبًا، ولنفرض أنّه عكس اتجاه عقارب الساعة. في هذه الحالة تنتج $\vec{\mathbf{F}}_A$ عزم دورانٍ موجب، $\tau_A = r_A F_A$؛ لأنّ ذراع القوّة هو r_A. $\vec{\mathbf{F}}_B$ وبالمقابل تنتج عزم دورانٍ سالب (مع اتجاه عقارب الساعة) ولا يؤثّر عموديًّا في r_B، لذلك علينا استعمال مركبتها العموديّة لحساب ما تنتجه من عزم: $\tau_B = -r_B F_{B\perp} = -r_B F_B \sin\theta$، حيث $\theta = 60^\circ$.

(لاحظ أنّ θ يجب أن تكون الزاوية بين $\vec{\mathbf{F}}_B$ وخطٍّ قطريٍّ من المحور).

الحل: عزم الدوران المحصّل هو

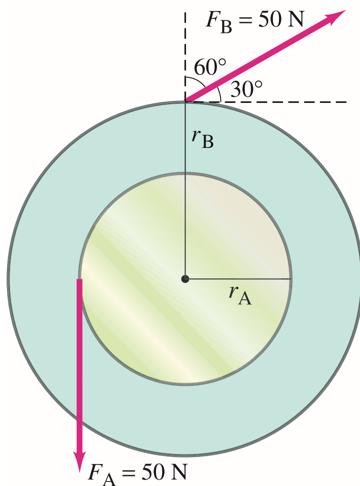
$$\tau = r_A F_A - r_B F_B \sin 60^\circ$$
$$= (0.30\ \text{m})(50\ \text{N}) - (0.50\ \text{m})(50\ \text{N})(0.866) = -6.7\ \text{m}\cdot\text{N}$$

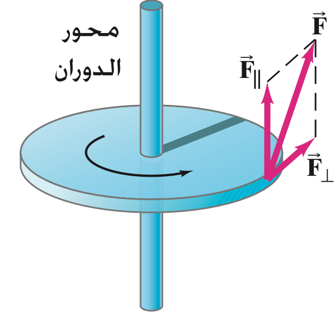
هذا العزم المحصّل يعمل على تسارع دوران الدولاب باتجاه عقارب الساعة.

ملحوظة: للقوّتين المقدار نفسه ، لكنّهما تنتجان عزمًا محصّلا، نظراً لاختلاف ذراعي قوتيهما.

الشكل **8-16** (المثال 8-9).

عزم الدوران الناتج من $\vec{\mathbf{F}}_A$ يؤدي إلى تسارع الدولاب بعكس اتجاه عقارب الساعة أما العزم الناتج من $\vec{\mathbf{F}}_B$ فيؤدي إلى تسارع الدولاب مع اتجاه عقارب الساعة.





الشكل 8-17: مركبة $\vec{F}$ فقط هي التي تعمل على المستوى العموديّ على محور الدوران، وتعمل $\vec{F}_{\perp}$، على إدارة الدولاب حول المحور. أمّا المركبة الموازية للمحور $\vec{F}_{\parallel}$ فستؤدّي إلى حركة المحور نفسه، الذي نفرض أن يكون مثبتًا.

*** القوى التي تعمل على إمالة المحور**

نتناول هنا الدوران حول محورٍ ثابت، وهكذا نعتبر فقط القوى التي تؤثّر في مستوىً عموديٍّ على محور الدوران. فإذا كانت هناك قوّة (أو مركبة قوّة) تعمل موازيةً لمحور الدوران، فإنّها سوف تؤدّي إلى إمالة محور الدوران-المركبة $\vec{F}_{\parallel}$ في (الشكل 8-17) كمثال على ذلك. وبما أنّنا نفرض أنّ اتّجاه المحور يبقى ثابتًا، فإمّا أن لا يكون هناك مثل هذه القوى، أو أنّ المحور سيكون مبنيًا على وسادةٍ أو مَفْصِلٍ تبقي المحور ثابتًا. وهكذا فإنّ قوّة، أو مركبة قوّة ($\mathbf{F}_{\perp}$ في الشكل 8-17)، في مستوىً عموديٍّ على المحور ستؤدّي إلى الدوران، وهذه فقط هي التي نأخذها في الحسبان.

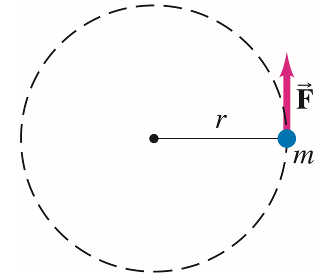
5-8 ديناميكا الدوران؛ عزم الدوران والقصور الدورانيّ

لقد ناقشنا أنّ التسارع الزاوي α لجسمٍ يدور يتناسب مع العزم المحصل τ المؤثّر فيه:

$$\alpha \propto \Sigma\tau$$

حيث نكتب $\Sigma\tau$ لنتذكّر أنَّ عزم الدوران المحصّل* (مجموع كلّ عزوم الدوران المؤثّرة في الجسم) هو الذي يتناسب مع α. وهذا يناظر قانون نيوتن الثاني في الحركة الانتقاليّة $a \propto \Sigma F$، ولكن هنا حلّ عزم الدوران مكان القوّة، وبالمقابل التسارع الزاوي α يأخذ مكان التسارع الخطّيّ a. في الحالة الخطيّة، فإنّ التسارع لا يتناسب مع القوّة المحصّلة فقط، بل إنّه يتناسب عكسيًّا مع قصور الجسم، الذي ندعوه بالكتلة m. وهكذا نستطيع كتابة $a = \Sigma F/m$. ولكن ما الذي يقوم بدور الكتلة في حالة الدوران؟ هذا ما سوف نشرع في تحديده. وفي الوقت نفسه، سنرى أنّ العلاقة $\alpha \propto \Sigma\tau$ تتبع مباشرة قانون نيوتن الثاني، $\Sigma F = ma$. نفترض أولًا حالةً بسيطةً جدًا: جُسيمٌ كتلته m يدور في دائرةٍ نصف قطرها r في نهاية خيطٍ أو قضيب، يمكن أن نهمل كتلته بالمقارنة مع m (الشكل 8-18)، وسنفرض قوّةً مفردة F تؤثّر في m كما هو مبيّن. العزم الذي يؤدّي إلى التسارع الزاوي هو $\tau = rF$. وإذا استخدمنا قانون نيوتن الثاني للكميّات الخطيّة، $\Sigma F = ma$، و (المعادلة 8-5) التي تربط التسارع الزاوي بالتسارع الخطّيّ المماسي، $a_{\tan} = r\alpha$ فإنّنا نحصل على

$$F = ma$$
$$= mr\alpha$$



الشكل 8-18: كتلة m تدور في دائرة نصف قطرها r حول نقطة ثابتة.

وعند ضرب طرفي هذه المعادلة في r، نجد أنَّ عزم الدوران $\tau = rF$ يعطى بـ

$$\tau = mr^2\alpha \quad \text{[جسيم واحد]} \quad \textbf{(8-11)}$$

وهنا أخيرًا لدينا علاقةٌ مباشرةٌ بين التسارع الزاوي وعزم الدوران المؤثر τ. الكمية mr^2 تمثّل القصور الدورانيّ للجسيم وتعرف بـ **عزم القصور الذاتي**.

والآن، دعنا ندرس جسمًا جاسئًا يدور، مثل دولابٍ يدور حول محورٍ بمنتصفه. يمكن أن نفكّر في الدولاب بأنّه مكوّنٌ من عددٍ كبيرٍ من الجُسيمات على أبعادٍ متعدّدةٍ من محور الدوران. ويمكن تطبيق (المعادلة 8-11) لكلّ جُسيم، ثمّ نجمع على الجسيمات جميعها. مجموع عزوم الدوران المختلفة هو العزم المحصّل، $\Sigma\tau$، ولذلك نحصل على:

$$\Sigma\tau = \left(\Sigma mr^2\right)\alpha \quad \textbf{(8-12)}$$

أخرجنا a عاملًا مشتركًا لأنّها متساوية للجسيمات جميعها.

والمجموع Σmr^2 يمثّل حاصل جمع الكتل للجسيمات جميعها مضروبةً في مربّع المسافة للجسيمات من محور الدوران.

* تذكّر من خلال (الفصل 4)، أنَّ Σ (الحرف اليوناني سيجما) يعني "مجموع"

الدوران. إذا أشرنا إلى الجسيم برقم (1,2,3...)، عندها $\Sigma mr^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \cdots$

تُسمّى هذه الكميّة **بعزم القصور الذاتي** (أو القصور الدوراني) I للجسم:

$$I = \Sigma mr^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \cdots \qquad \textbf{(13-8)}$$

عزم القصور الذاتي.

بدمج (المعادلتين 8-12 و 8-13) ، يمكننا كتابة

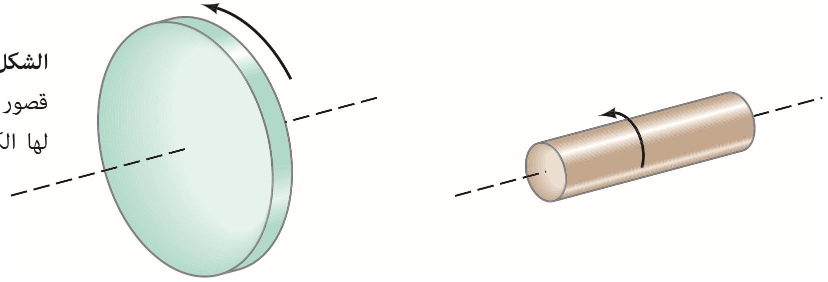
$$\Sigma\tau = I\alpha. \qquad \textbf{(14-8)}$$

قانون نيوتن الثاني في الدوران.

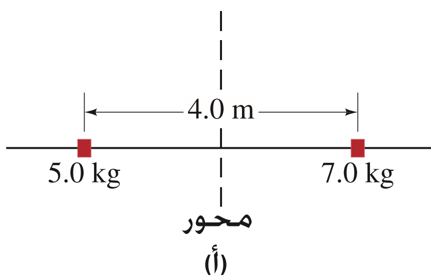
تذكّر من الفصل الرابع أنّ $\sum$ (حرفٌ يونانيٌّ سيجما) يعني "مجموع".

هذا هو المكافىء الدورانيُّ لقانون نيوتن الثاني. إنَّه ينطبق على دوران جسمٍ جاسيءٍ حول محورٍ ثابت*.
نرى أنّ عزم القصور الذاتي، I، وهو مقياس للقصور الدوراني لجسم، يؤدّي الدور نفسه في الحركة الدورانيّة الذي تؤدّيه الكتلة في الحركة الانتقالية. وكما يمكن رؤيته من (المعادلة 8-13) ، يعتمد القصور الدوراني ليس على الكتلة فحَسْبُ، بل على كيفيَّة توزيع هذه الكتلة بالنسبة إلى المحور أيضًا. فمثلا أسطوانةٌ ذات قطرٍ كبيرٍ سيكون لها قصورٌ أكبر من أخرى مساوية في الكتلة، ولكن بقطرٍ أصغر (ومن ثَمَّ طول أكبر)، (الشكل 8-19): فالأولى ستكون أصعب في البدء بالدوران، وكذلك أصعب عند الوقوف. عندما تتركّز الكتلة بعيدًا عن محور الدوران، فإنّ القصور الدورانيّ سيكون أكبر. و بالنسبة للحركة الدورانيّة، فإنّه لا يمكن اعتبار الكتلة كما لو أنّها مركّزةٌ في مركز الكتلة.

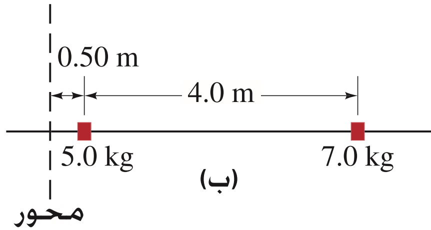
تنويه:
لا يمكن اعتبار الكتلة مركزة في CM للحركة الدورانية.



الشكل 8-19: أسطوانة ذات قطر أكبر، يكون لها قصور دوراني أكبر من أخرى أصغر في القطر، لكن لها الكتلة نفسها.



الشكل 8-20: حساب عزم القصور الذاتي.



المثال 8-10 وزنان على قضيب: محور مختلف

وزنان صغيران كتلتاهما 5.0 kg و 7.0 kg مثبتان على بعد 4.0 m على قضيب خفيف (يمكن إهمال كتلته)، كما يبين (الشكل 8-20) . احسب عزم القصور الذاتي للنظام (أ) عندما يدور حول محور في منتصف المسافة بينهما، (الشكل 8-20أ) ، و (ب) عندما يدور حول محور على بعد 0.50 m إلى يسار كتلة 5.0-kg (الشكل 8-20ب).

النهج: في كل حالة، يحسب عزم القصور الذاتي بالجمع عند الجزأين باستعمال (المعادلة 8-13).

الحل: (أ) كلا الوزنين على بعد 2.0 m من محور الدوران. ومن ثَمَّ

$$I = \Sigma mr^2 = (5.0\,\text{kg})(2.0\,\text{m})^2 + (7.0\,\text{kg})(2.0\,\text{m})^2$$
$$= 20\,\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 28\,\text{kg}\cdot\text{m}^2 = 48\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

(ب) الآن، الكتلة 5.0-kg على بعد 0.50 m من المحور، أمّا الكتلة 7.0-kg فعلى بعد 4.50 m من المحور وهكذا:

$$I = \Sigma mr^2 = (5.0\,\text{kg})(0.50\,\text{m})^2 + (7.0\,\text{kg})(4.5\,\text{m})^2$$
$$= 1.3\,\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 142\,\text{kg}\cdot\text{m}^2 = 143\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

ملحوظة: يعرض هذا المثال نقطتين مهمَّتين.هما: 1 - عزم القصور الذاتي لنظامٍ معيّنٍ يختلف باختلاف محاور الدوران. 2 - نرى في الجزء (ب) أنّ مساهمة الكتلة القريبة من المحور تكون قليلةً في عزم القصور الذاتي، وهنا الكتلة 5.0-kg ساهمت بأقل من 1% من العزم الكلّي.

تنويه:
I يعتمد على محور الدوران، وعلى توزيع الكتلة.

* (المعادلة 8-14) تنطبق أيضًا عندما ينتقل الجسم كذلك بتسارع. ما دام I و α يحسبان حول مركز كتلة الجسم. ومحور الدوران خلال مركز الكتلة لا يغيّر اتجاهه.

الشكل 8-21: عزم القصور الذاتي لأجسام مختلفة، تركيبها منتظم.

	الجسم	موضع المحور		عزم القصور
(أ)	**حلقة رقيقة نصف قطرها** R	خلال المركز	محور	MR^2
(ب)	**حلقة رقيقة نصف قطرها** R وعرضها W	خلال القطر المركزي	محور	$\frac{1}{2}MR^2 + \frac{1}{12}MW^2$
(جـ)	**أسطوانة مصمتة نصف** قطرها R	خلال المركز	محور	$\frac{1}{2}MR^2$
(د)	**أسطوانه مجوّفة نصف قطرها** الداخلي R_1 ونصف قطرها الخارجي R_2	خلال المركز	محور	$\frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$
(هـ)	**كرة منتظمة نصف قطرها** R	خلال المركز	محور	$\frac{2}{5}MR^2$
(و)	**قضيب طويل منتظم طوله** L	خلال المركز	محور	$\frac{1}{12}ML^2$
(ي)	**قضيب طويل منتظم طوله** L	خلال النهاية	محور	$\frac{1}{3}ML^2$
(ز)	**صفيحة مستطيلة رقيقة،** طولها L وعرضها W	خلال المركز	محور	$\frac{1}{12}M(L^2 + W^2)$

تتوزّع الكتلة لمعظم الأجسام العاديّة بصورةٍ متصلة، وحساب عزم القصور الدوراني، Σmr^2، يكون صعبًا. وعلى أيّ حال، يمكن الوصول إلى صيغ عزم القصور الدوراني (باستخدام حساب التفاضل والتكامل) للأجسام المنتظمة بدلالة أبعاد الأجسام. (الشكل 8-21)يبيّن هذه الصيغ لبعض الأجسام الصلبة حول المحاور المحدّدة. الجسم الوحيد الذي تكون نتيجته مباشرةً وواضحةً هو الحلقة النحيفة حول محورٍ يمرُّ بمركزها وعموديٌّ على مستوى الحلقة (الشكل 8-21أ). لهذا الجسم الكتلة كلُّها مركّزةٌ على البعد نفسه من المحور، R. وهكذا $\Sigma mr^2 = (\Sigma m)R^2 = MR^2$ حيث M هي الكتلة الكليّة للحلقة (الطوق).

وإذا كان الحساب صعبًا، فيمكن إيجاد I بالتجربة، وذلك بقياس التسارع الزاوي α حول محورٍ ثابتٍ ناتجٍ من عزم دوران، $\Sigma\tau$، ومن ثم تطبيق قانون نيوتن الثاني $I = \Sigma\tau/\alpha$، (المعادلة 8-14).

8-6 حل المسائل في الديناميكا الدورانية

عند التعامل مع عزم الدوران والتسارع الزاوي (المعادلة 8-14)، من المهمّ استعمال نظام وحداتٍ منسجم، وفي النظام الدولي SI فإن α بـ$\mathrm{rad/s^2}$؛ τ $\mathrm{m\cdot N}$، وعزم القصور، I، بـ $\mathrm{kg\cdot m^2}$.

طريقة حل المسائل **الحركة الدورانية**

1. كما في العادة، **ارسم مخططًا** واضحًا وكاملًا.

2. اختر الجسم أو الأجسام التي ستكون النظام المراد دراسته.

3. ارسم **مخطط الجسم الحر** للجسم قيد الدراسة (أو لكل جسم إذا كان هناك أكثر من واحد) مبينًا (جميع) القوى المؤثرة في الجسم فقط وأين تؤثر بالضبط، ومن ثَمَّ يمكنك تحديد عزم الدوران لكلٍّ منها. قوّة الجاذبيّة تؤثر في مركز الجذب CG للجسم (البند 7-8).

4. ميّز محور الدوران، وحدّد عزم الدوران حوله. اختر اتجاهات موجبة وسالبة (عكس اتجاه عقارب الساعة ومع اتجاهها)، وضع الإشارة الصحيحة لكلٍّ **عزم**.

5. طبّق **قانون نيوتن الثاني في الدوران**، $\Sigma\tau = I\alpha$. إذا لم يكن عزم القصور الذاتي مُعطًى، وليس هو المجهول المراد معرفته، فعليك تحديده أولاً. استعمل وحدات متناسقة، وهي في SI:

$$\alpha\,\text{rad/s}^2;\ \tau\,\text{m}\cdot\text{N};\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

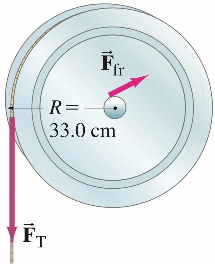
6. طبّق **قانون نيوتن الثاني** للانتقال أيضًا، $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$، وقوانين **أخرى**، أو مبادىء حسب اللزوم.

7. حلّ المعادلات الناتجة لإيجاد المجاهيل.

8. اعمل **تقييمًا** تقريبيًا لتحديد معقولية الحل.

المثال 11-8

بكرةٌ ثقيلةٌ قوّةٌ 15.0-N (تُمثَّل بالرمز $\vec{\mathbf{F}}_T$) تؤثّر في حبلٍ ملفوفٍ حول بكرةٍ كتلتها $M = 4.00\ \text{kg}$ ونصف قطرها $R = 33.0\ \text{cm}$، (الشكل 8-22). تتسارع البكرة من السكون إلى سرعة زاوية 30.0 rad/s في 3.00 s. إذا كان هناك عزم دوران ناتج من الاحتكاك $\tau_{fr} = 1.10\ \text{m}\cdot\text{N}$ حول المحور، حدد عزم القصور الذاتي للبكرة، إذا علمت أنّ البكرة تدور حول مركزها.



الشكل **8-22** (المثال 8-11).

النهج: نتّبع خطوات صندوق حلّ المسائل بصورةٍ صريحة.

الحل:

1. ارسم مخطّطًا. البكرة والحبل المثبت مبيّنةٌ في (الشكل 8-22) .

2. اختر النظام: البكرة

3. ارسم مخطّط الجسم الحر. القوّة التي يولّدها الحبل على البكرة مبيّنة $\vec{\mathbf{F}}_T$ في (الشكل 8-22) . قوّة الاحتكاك واضحة أيضًا، ولكنّنا أُعطينا عزمها فقط. وقوتان أخريان يمكن وضعهما ضمن المخطط: قوة الجاذبية mg للأسفل وأيّ قوة $\vec{\mathbf{F}}_T$ تعمل على تثبيت المحور في مكانه. هاتان القوتان لا تساهمان في العزم (ذراعهما يساوي صفرًا) ولذلك فهما ليستا مبيّنتان في الرسم.

4. حدّد العزوم الدورانية. يؤثّر الحبل بقوّة $\vec{\mathbf{F}}_T$ تعمل على حافّة البكرة، لذلك يكون ذراع عزمها R. العزم الناتج من الحبل RF_T بعكس اتجاه عقارب الساعة؛ حيث اخترناه ليكون موجبًا. عزم الاحتكاك مُعطًى $\tau_{fr} = 1.10\ \text{m}\cdot\text{N}$؛ ويعاكس الحركة وهو سالب.

5. طبّق قانون نيوتن الثاني في الدوران. العزم المحصل هو

$$\begin{aligned}\Sigma\tau &= RF_T - \tau_{fr}\\ &= (0.330\ \text{m})(15.0\ \text{N}) - 1.10\ \text{m}\cdot\text{N} = 3.85\ \text{m}\cdot\text{N}\end{aligned}$$

التسارع الزاوي يوجد من البيانات المعطاة حيث يستغرق تسارع البكرة 3.0 s من السكون إلى السرعة الزاوية $\omega = 30.0\ \text{rad/s}$:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{30.0\ \text{rad/s} - 0}{3.00\ \text{s}} = 10.0\ \text{rad/s}^2$$

نستطيع الآن أن نحل لإيجاد I بقانون نيوتن الثاني (الخطوة 7).

6. حسابات أخرى: لسنا بحاجة إليها.

7. الحل لإيجاد المجاهيل. نحل لإيجاد I باستعمال قانون نيوتن الثاني في الدوران، $\Sigma\tau = I\alpha$

$$I = \frac{\Sigma\tau}{\alpha} = \frac{3.85\ \text{m}\cdot\text{N}}{10.0\ \text{rad/s}^2} = 0.385\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

8. اعمل تقديرًا تقريبيًّا. يمكن حساب عزم القصور الذاتي بالتقريب بفرض أن البكرة أسطوانة منتظمة، وباستعمال (الشكل 8-21جـ) .

$$I = \tfrac{1}{2}MR^2 = \tfrac{1}{2}(4.00\ \text{kg})(0.330\ \text{m})^2 = 0.218\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

فائدة وقدرة الحسابات التقديرية

هذه القيمة. برتبة النتيجة نفسها التي توصّلنا إليها، ولكنّها أقلّ عدديًّا. هذا بفرض أن البكرة ليست أسطوانة منتظمة، بل معظم كتلتها مركّز نحو الحافّة الخارجية. مثل هذه البكرة يتوقّع أن يكون عزمها القصوري أكبر من أسطوانةٍ منتظمةٍ مُصمتةٍ لها الكتلة نفسها ، طوقًا رقيقًا، (الشكل 8-21 أ) ، له عزم قصورٍ دورانيٍّ أكبر من بكرتنا، وفي الواقع $I = MR^2 = 0.436\ \text{kg.m}^2$.

مثال إضافي – ذو تحدٍّ أكبر.

المثال 8-12 **البكرة والدلو.**

افترض مّرةً أخرى البكرة في (الشكل 8 - 22 والمثال 8 - 11) . ولكن هذه المرّة،بدلًا من قوّة ثابتة 15.0-N تؤثّر في الحبل، لدينا الآن دلوٌ وزنه $w = 15.0\ \text{N}$ $(m = w/g = 1.53\ \text{kg})$ معلّق بالحبل. انظر (الشكل 8 - 23أ) . نفرض أنّ الحبل مهمل الكتلة، ولا يُمطّ أو ينزلق على البكرة. احسب التسارع الزاوي a للبكرة والتسارع الخطّيّ a للدلو.

النهج: هذا الوضع يشبه إلى حدٍّ ما (المثال 8 - 11، الشكل 8 - 22) . لكنّ هناك فرقٌ كبير: الشدّ في الحبل الآن غير معروف، ولم يعد يساوي وزن الدلو إذا تسارع الدلو. نظامنا له جزءان: الدلو الذي يستطيع عمل حركةٍ انتقاليّة (الشكل 8-23ب هو مخطط الجسم الحر)؛ والبكرة لا تنتقل من مكانها، ولكنّها تدور. نطبّق الصيغة الدورانيّة لقانون نيوتن الثاني على البكرة، $\Sigma\tau = I\alpha$، والصيغة الخطيّة على الدلو، $\Sigma F = ma$.

الحل: لتكن F_T الشدّ في الحبل، ومن ثَمّ فإنّ قوّة F_T تعمل عند حافّة البكرة ، نطبّق قانون نيوتن الثاني، (المعادلة 8 - 14) ، لدوران البكرة:

$$I\alpha = \Sigma\tau = RF_T - \tau_{fr} \qquad \text{[البكرة]}$$

ثم ننظر إلى الحركة (الخطيّة) للدلو ذي الكتلة m.. مخطط الجسم الحر للدلو، يبين أن هناك قوتين تؤثران في الدلو؛ قوّة الجاذبية mg تؤثّر للأسفل، والشدّ في الحبل F_T يسحب للأعلى. نطبّق قانون نيوتن الثاني، $\Sigma F = ma$، للدلو، فنحصل على (آخذين الاتجاه نحو الأسفل موجبًا):

$$mg - F_T = ma \qquad \text{[الدلو]}$$

لاحظ أنّ الشدّ F_T وهو القوّة المؤثّرة في حافّة البكرة، لا يساوي وزن الدلو $(= mg = 15.0\ \text{N})$. لا بدَّ من وجود قوّة محصّلة على الدلو إذا كان متسارعًا، وهكذا $F_T < mg$. ونرى ذلك من المعادلة الأخيرة $F_T = mg - ma$.

للحصول على α: نلاحظ أنّ التسارع المماسيَّ لنقطةٍ على حافّة البكرة هو التسارع نفسه للدلو إذا لم يُمطّ الحبل أو ينزلق. ومن ثَمّ نستطيع استعمال (المعادلة 8-5) ، $a_{tan} = a = R\alpha$ بتعويض $F_T = mg - ma = mg - mR\alpha$ في المعادلة الأولى (قانون نيوتن الثاني لدوران البكرة)، نحصل على

$$I\alpha = \Sigma\tau = RF_T - \tau_{fr} = R(mg - mR\alpha) - \tau_{fr} = mgR - mR^2\alpha - \tau_{fr}$$

تظهر في الحدّ الثاني على اليمين، نأخذ هذا الحدّ إلى الجانب الأيسر، ونحل لإيجاد α:

$$\alpha = \frac{mgR - \tau_{fr}}{I + mR^2}$$

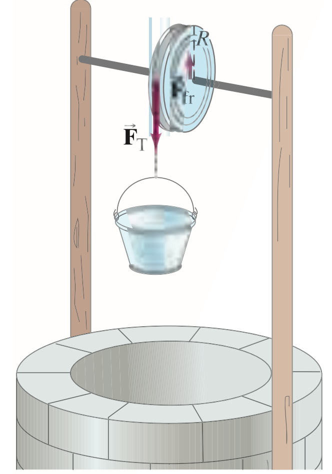
يشير البسط $(mgR - \tau_{fr})$ إلى عزم الدوران المحصل، أمّا المقام $(I + mR^2)$ فيشير إلى عزم القصور الدورانيّ للنظام. وهكذا بما أنّ $I = 0.385\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ و $m = 1.53\ \text{kg}$، و $\tau_{fr} = 1.10\ \text{m}\cdot\text{N}$ (من المثال 8-11)،

$$\alpha = \frac{(15.0\ \text{N})(0.330\ \text{m}) - 1.10\ \text{m}\cdot\text{N}}{0.385\ \text{kg}\cdot\text{m}^2 + (1.53\ \text{kg})(0.330\ \text{m})^2} = 6.98\ \text{rad/s}^2$$

التسارع الزاوي هنا أقل من $10.0\ \text{rad/s}^2$ في (المثال 8 - 11).؟ لأن $F_T\ (= mg - ma)$ أقل من 15.0-N وزن الدلو، mg. التسارع الخطّيّ للدلو هو

$$a = R\alpha = (0.330\ \text{m})(6.98\ \text{rad/s}^2) = 2.30\ \text{m/s}^2$$

ملحوظة: الشدّ في الحبل F_T أقلّ من mg؛ لأن الدلو يتسارع.



(أ)



(ب)

الشكل 8-23 (المثال 8-12) .
(أ) البكرة والدلو الساقط كتلته m.
(ب) مخططات الجسم الحر للدلو.

8-7 الطاقة الحركية الدورانية

إنّ الكمية $\frac{1}{2}mv^2$ هي الطاقة الحركيّة لجسمٍ يخضع لحركة انتقاليّة. والجسم الذي يدور حول محورٍ ما يُقال إنّ له **طاقةٌ حركيّةٌ دورانيّة**. بمقابلة الطاقة الحركيّة الانتقاليّة، نتوقع أنّ الطاقة الدورانيّة تُعطى بالعلاقة $\frac{1}{2}I\omega^2$، حيث I عزم القصور الذاتي للجسم، و ω سرعته الزاوية. ومن المؤكد إثبات صحة هذا.

افترض أنّ أيّ جسمٍ يدور كأنّه مكوّنٌ من جسيماتٍ دقيقةٍ كثيرة، كتلة كلٍّ منها m. إذا فرضنا أنّ r تمثّل المسافة لكلّ جسيمٍ عن محور الدوران، فإنّ سرعته الخطيّة تكون $v = r\omega$. الطاقة الحركيّة الكليّة للجسم كلّه هي مجموع الطاقات الحركيّة للجسيمات جميعها.

$$\text{KE} = \Sigma\left(\tfrac{1}{2}mv^2\right) = \Sigma\left(\tfrac{1}{2}mr^2\omega^2\right)$$
$$= \tfrac{1}{2}\Sigma\left(mr^2\right)\omega^2$$

أخذنا $\frac{1}{2}$ و ω^2 خارجًا لأنّهما ثابتان للجسيمات جميعها في الجسم الجاسئ. بما أنّ $\Sigma mr^2 = I$، عزم القصور الدوراني، نرى أنّ الطاقة الحركيّة لجسمٍ جاسئٍ يدور كما نتوقّع

عزم القصور الذاتي.

$$\text{KE}_{\text{دورانيّة}} = \tfrac{1}{2}I\omega^2 \qquad \textbf{(15-8)}$$

الوحدات هي جول (joule) كما في أنواع الطاقة كلّها.

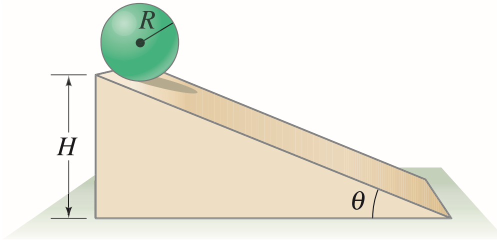
الجسم الذي يدور في حال مركز كتلته (CM) يعمل حركة انتقاليّة، سيكون له طاقةٌ حركيّةٌ وأخرى دورانيّة.

(المعادلة 8-15)تعطي الطاقة الحركيّة الدورانيّة إذا كان محور الدوران ثابتًا. وإذا كان الجسم متحركًا (مثل دولاب يتدحرج نحو أسفل تلّة) فإنّ هذه المعادلة لا زالت تنطبق ما دام محور الدوران ثابتًا من حيث الاتجاه. الطاقة الحركيّة الكليّة هي:

الطاقة الكلية KE (انتقالية + دورانية)

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}Mv_{\text{CM}}^2 + \tfrac{1}{2}I_{\text{CM}}\omega^2 \qquad \textbf{(16-8)}$$

حيث v_{CM} هي السرعة الخطيّة لمركز الكتلة، أمّا I_{CM} فهو عزم القصور حول محورٍ يمرّ بمركز الكتلة، وω هي السرعة الزاوية حول هذا المحور، في حين تشير M إلى الكتلة الكليّة للجسم.



الشكل 8-24: كرة تتدحرج إلى أسفل منحدر لها طاقتين؛ انتقالية ودورانية. (المثال 8-13).

المثال 8-13 كرةٌ تتدحرج إلى أسفل منحدر (سطح مائل)

ماذا ستكون سرعة كرةٍ مصمتةٍ كتلتها M ونصف قطرها R عندما تصل إلى قاعدة سطح مائل حيث تبدأ من السكون من على ارتفاع رأسي H وتتدحرج من غير انزلاق؟ (انظر الشكل 8-24) . (افرض أنّ هناك قدرًا من الاحتكاك السكوني، الذي لا يعمل شغلًا، ولذلك لا يحدث انزلاق.) قارن النتيجة مع تلك التي لجسم ينزلق أسفل منحدرٍ عديم الاحتكاك.

النهج: نستعمل قانون حفظ الطاقة مع طاقة وضع الجاذبيّة؛ لأنّها تتضمّن طاقةً حركيّةً دورانيّةً بالإضافة إلى الطاقة الحركيّة الانتقاليّة.

الحل: الطاقة الكليّة عند أيّ نقطةٍ على ارتفاع y فوق قاعدة السطح المائل هي

$$\tfrac{1}{2}Mv^2 + \tfrac{1}{2}I_{\text{CM}}\omega^2 + Mgy$$

حيث v هي سرعة مركز الكتلة، و Mgy هي طاقة وضع الجاذبيّة. وبتطبيق قانون حفظ الطاقة، نساوي الطاقة الكليّة عند القمّة $(y = H, v = 0, \omega = 0)$ بالطاقة الكليّة عند القاعدة $(y = 0)$:

$$0 + 0 + MgH = \tfrac{1}{2}Mv^2 + \tfrac{1}{2}I_{\text{CM}}\omega^2 + 0$$

عزم القصور الذاتيّ لكرةٍ مصمتةٍ حول محورٍ يمرّ بمركزها هو $I_{\text{CM}} = \frac{2}{5}MR^2$، (الشكل 8-12ي) . بما أنّ الكرة تتدحرج من غير انزلاق، فإنّ لدينا $\omega = v/R$ (تذكر الشكل 8-8). ومن ثَمّ

$$MgH = \tfrac{1}{2}Mv^2 + \tfrac{1}{2}\left(\tfrac{2}{5}MR^2\right)\left(\frac{v^2}{R^2}\right)$$

وباختصار M و R نجد أن

$$\left(\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{5}\right)v^2 = gH$$

أو

$$v = \sqrt{\tfrac{10}{7}gH}$$

يمكن مقارنة هذه النتيجة، كرةٌ تتدحرج بتلك السرعة لجسمٍ ينزلق على منحدرٍ من غير دوران أو احتكاك. $\frac{1}{2}mv^2 = mgH$ (انظر نتيجتنا فوق بإزالة حدّ الدوران). ومن ثَمّ $v = \sqrt{2gH}$، وهي أكبر من نتيجتنا السابقة. الجسم الذي ينزلق على سطحٍ دون دورانٍ أو احتكاكٍ يحوّل طاقة الوضع كلّها إلى طاقةٍ حركيةٍ انتقاليّة (لا شيء يُحوّل إلى طاقة حركية دورانية). لذا، تكون سرعة مركز كتلته أكبر.

ملحوظة: نتيجتنا للكرة المتدحرجة تبين (ربما مستغربًا) أنّ السرعة v لا تعتمد على الكتلة M أو نصف القطر R للكرة.

حل المسألة:

يتم إضافة طاقة الحركة الدورانية إلى الأشكال الأخرى للطاقة للحصول على الطاقة الكلية والتي تكون محفوظة.

المثال المفاهيمي 14-8 من الأسرع؟

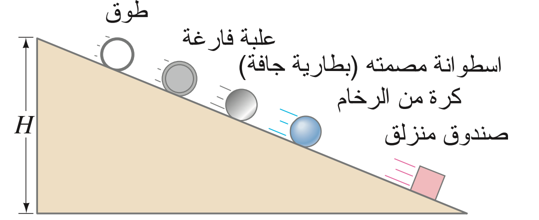
أجسامٌ متعدّدةٌ تتدحرج من غير انزلاق أسفلَ سطحٍ مائل من على ارتفاع H، تبدأ كلّها من السكون وفي اللحظة نفسها. الأجسام هي طوقٌ رقيق، قطعة رخام كرويّة، أسطوانة مُصمتة (بطاريّة خليّة D – علبة صابون فارغة. بالإضافة إلى صندوقٍ ينزلق من غير احتكاك. بأيّ ترتيب تصل الأجسام إلى قاعدة السطح المائل؟

الحل: الصندوق المنزلق يكسب السباق؛ لأنّ النقصان في طاقة الوضع (MgH) يتحوّل كاملًا إلى طاقةٍ حركيّةٍ انتقاليّة KE للصندوق، ولكن للأجسام المتدحرجة، فإنّ طاقة الوضع PE الابتدائيّة تقسم بين طاقةٍ حركيةٍ انتقاليّةٍ وأخرى دورانيّة، ولذلك تكون سرعتها الخطّية أقل. ولكلّ جسمٍ متدحرج، يمكننا أن نقول إنّ النقص في طاقة الوضع يساوي الزيادة في الطاقة الحركيّة:

$$MgH = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I_{CM}\omega^2$$

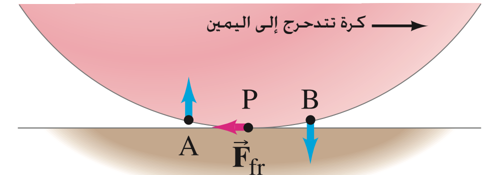
إنّ لكلّ هذه الأجسام المتدحرجة، عزم القصور الدوراني I_{CM}، وهو معاملٌ عدديٌّ مضروبٌ في الكتلة M ومربّع نصف القطر R^2 (الشكل 8-21). الكتلة M موجودةٌ في كلّ حد، ولذلك فإنّ السرعة الخطيّة N لا تعتمد على الكتلة M، ولا تعتمد على نصف القطر R لأن $\omega = v/R$، ولهذا R^2 تختصر للأجسام المتدحرجة جميعها، كما في (المثال 8-13). وهكذا تعتمد السرعة عند قاعدة المنحدر على المعامل I_{CM} الذي يعبر عن كيفيّة توزيع الكتلة. الطوق الذي تتوزّع كتلته كلّها عند بعدٍ يساوي نصف القطر R ($I_{CM} = MR^2$)، له أكبر عزمِ قصوري، فسوف يكون له أقلّ سرعة، وسوف يصل بعد البطارية-D ($I_{CM} = \frac{1}{2}MR^2$)، التي ستكون بعد قطعة الرخام الكرويّة ($I_{CM} = \frac{2}{5}MR^2$). العلبة الفارغة، وهي طوقٌ وقرصٌ صغير، معظم كتلتها مركّز عند نصف القطر R، ولذلك ستكون أسرع قليلًا من الطوق، ولكنّها أبطأ من البطاريّة D. (انظر الشكل 8-25) .

ملحوظة: كما في (المثال 8-13)، السرعة أسفل المنحدر لا تعتمد على كتلة الجسم M أو نصف القطر R، وإنّما تعتمد على شكل الجسم فقط (وارتفاع المنحدر H).



الشكل 8-25: المثال 8-14

الشكل 8-26: كرة تتدحرج إلى اليمين على سطح مستو. نقطة التماس مع الأرض عند أي لحظة، P، لحظيا ساكنة. نقطة A إلى يسار P تتحرك تقريبا رأسيا نحو الأعلى في اللحظة المبينة، أما النقطة B إلى اليمين فتتحرك رأسيا نحو الأسفل تقريبا. بعد لحظة ستمس النقطة B المستوى وتصبح ساكنة لحظياً. وهكذا لا يعمل شغل بواسطة قوة الاحتكاك السكوني.

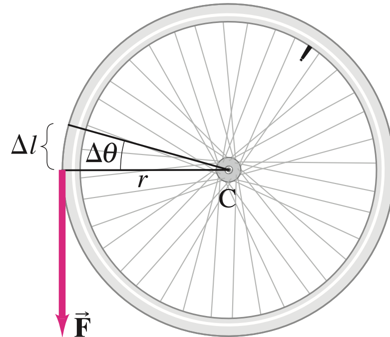


تنويه: تتحرك الأجسام المتدحرجة أبطأ من المنزلقة بسبب الطاقة الحركية الدورانية وليس الاحتكاك.

لو كان هناك بعض الاحتكاك السكوني بين الأجسام المتدحرجة والمستوى في هذه الأمثلة، لكانت الأجسام المستديرة ستنزلق بدلاً من التدحرج، أو لكانت ستنزلق وتتدحرج معًا. لا بدّ من وجود الاحتكاك السكونيّ لجعل الجسم المستدير يتدحرج. لا توجد حاجةٌ لأخذ الاحتكاك بالحسبان عند حساب الطاقة؛ لأنّه احتكاكٌ سكونيٌّ ولا يعمل شغلاً-نقطة تماسّ الكرة في كلّ لحظةٍ لا تنزلق، ولكنّها تتحرّك عموديًّا على المستوى (أولًا للأسفل، ومن ثمّ نحو الأعلى كما هو مبيّن في الشكل 8-26) عند تدحرج الكرة. لهذا، لا يعمل شغلاً من قبل الاحتكاك السكوني؛ لأنّ القوّة وكذلك الإزاحة عموديتان. إنّ سبب بطء الأجسام المتدحرجة في (المثالين 8-13 و8-14) عن الأجسام المنزلقة ليس لأنّ الاحتكاك يعمل شغلا، بل لأنّ بعض طاقة الوضع PE تتحوّل إلى طاقةٍ حركيّةٍ دورانيّة تاركًا مقدارًا أقلّ للطاقة الحركيّة الانتقالية.

الشغل المبذول من عزم الدوران

الشغل المبذول على جسمٍ يدور حول محورٍ ثابت، مثل البكرات في (الشكل 8-22 والشكل 8-23) ، يمكن كتابته بدلالة الكميات الزاوية. كما هو مبيّن في (الشكل 8-27) ، القوة F تولّد عزمًا $\tau = rF$ على دولاب تبذل شغلاً $W = F\Delta l$ في إدارة الدولاب مسافةً صغيرة Δl عند نقطة تأثير القوّة $\vec{F}$.



الشكل 8-27: عزم الدوران $\tau = rF$ ينتج شغلا عند إدارة دولاب $W = F\Delta l = Fr\Delta\theta = \tau\Delta\theta$

الدولاب دار زاوية صغيرة $\Delta\theta = \Delta l/r$ (المعادلة 8-1).
أي

$$W = F\Delta l = Fr\Delta\theta$$

وبما أن $\tau = rF$، لذلك

الشغل المبذول من عزم الدوران

$$W = \tau\Delta\theta \qquad \textbf{(8-17)}$$

هو الشغل المبذول من عزم الدوران τ عن دوران الدولاب خلال زاوية $\Delta\theta$. وأخيرًا القدرة P هي معدّل عمل الشغل:

$$P = W/\Delta t = \tau\Delta\theta/\Delta t = \tau\omega$$

8-8 الزخم الزاوي وحفظة

لاحظنا خلال هذا الفصل أنّه إذا استعملنا المتغيّرات الزاوية المناسبة، فإنّ معادلات الحركة الدورانيّة تشبه تلك التي في الحركة الانتقاليّة العاديّة. ورأينا في البند السابق، مثلًا، أنّ الطاقة الحركيّة الدورانيّة يمكن كتابتها $\frac{1}{2}I\omega^2$ وهي تشبه الطاقة الحركيّة الانتقاليّة $\frac{1}{2}mv^2$. وبصورةٍ مماثلة، الزخم الخطّيّ $p = mv$، له نظيرٌ دورانيٌّ يُدعى الزخم الزاوي، L. لجسمٍ يدور حول محورٍ ثابت يعرف بـ

الزخم الزاوي

$$L = I\omega \qquad \textbf{(8-18)}$$

حيث I هو **عزم القصور الذاتي**، و ω هي السرعة الزاوية حول محور الدوران. الوحدات الدوليّة SI للزخم الزاوي L هي $kg \cdot m^2/s$ وليس لها اسمٌ خاص.

رأينا في الفصل 7 (البند 7-1) أن قانون نيوتن الثاني ليس فقط $\Sigma F = ma$، بل أيضًا على نحوٍ عامٍّ بدلالة الزخم (المعادلة 7-2) $\Sigma F = \Delta p/\Delta t$، و بطريقةٍ مماثلةٍ مكافئ قانون نيوتن في الحركة الدورانية، الذي رأيناه في (المعادلة 8-14)يمكن كتابته $\Sigma\tau = I\alpha$، كذلك يمكن أن يُكتب بدلالة الزخم الزاوي:

قانون نيوتن للدوران

$$\Sigma\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} \qquad \textbf{(8-19)}$$

حيث $\Sigma\tau$ هو العزم الكلّي، الذي يعمل لإدارة الجسم، ΔL التغيّر في الزخم الزاوي في فترةٍ زمنيّة Δt.
(المعادلة 8-14)، $\Sigma\tau = I\alpha$ هي حالةٌ خاصّةٌ من (المعادلة 8-19) عندما يكون عزم القصور الذاتيّ ثابتًا.
ويمكن رؤية ذلك كما يلي: إذا كان لجسمٍ سرعةٌ زاوية ω_0 عند $t = 0$، وسرعةٌ زاوية ω بعد فترةٍ زمنية Δt، عندها يكون التسارع الزاوي (المعادلة 8-3):

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$$

ثمّ من (المعادلة 8-19) ، لدينا

$$\Sigma\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{I\omega - I\omega_0}{\Delta t} = \frac{I(\omega - \omega_0)}{\Delta t} = I\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = I\alpha$$

وهي (المعادلة 8-14).
الزخم الزاوي مفهومٌ مهمٌّ في الفيزياء؛ لأنّه تحت ظروفٍ معيّنة، يكون كميّةً محفوظة. ويمكن أن نرى من (المعادلة 8-19) أنّه إذا كان العزم الكلّي $\Sigma\tau$ على جسمٍ يساوي صفرًا، ومن ثَمَّ $\Delta L/\Delta t = 0$. أي أن L لا يتغيّر. هذا هو **قانون حفظ الزخم الزاوي** لجسمٍ يدور.

حفظ الزخم الزاوي

الزخم الزاوي الكلّي لجسمٍ يدور يبقى ثابتًا إذا كان العزم الكلّي المؤثّر فيه يساوي صفرًا.

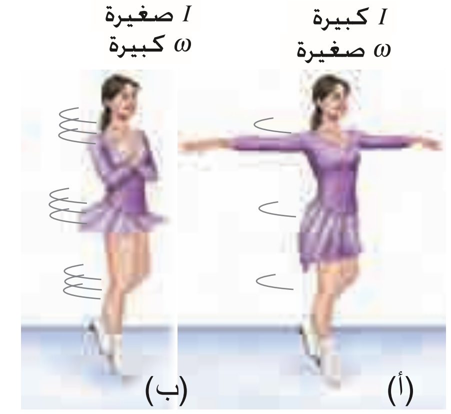
يعدّ قانون حفظ الزخم الزاوي من أروع قوانين الحفظ في الفيزياء، بالإضافة إلى الطاقة والزخم الخطّي.
إذا كان العزم الدورانيّ الكلّيّ المؤثّر في جسمٍ يساوي صفرًا، والجسم يدور حول محور ثابت، أو محورٍ يمرّ من مركز كتلة الجسم وله اتّجاه ثابت، فيمكننا كتابة

$$I\omega = I_0\omega_0 = \text{ثابت}$$

I_0 و ω_0 هما عزم القصور والسرعة الزاوية على الترتيب عند لحظةٍ زمنيّةٍ ابتدائيّة $(t = 0)$ و I ، ω هما قيمتاهما عند لحظةٍ لاحقة.

أجزاء الجسم يمكن أن تغيّر مواقعها نسبةً إلى بعضها بعضًا، لذا يتغيّر I، لكن عندما تتغيّر ω أيضًا للإبقاء على حاصل الضرب $I\omega$ ثابتًا.

وهناك ظواهر كثيرةٌ مهمّةٌ يمكن فهمها على أساس حفظ الزخم الزاوي. اعتبر متزلجةً تعمل حركةً مغزليّة على أطراف زلّاجتها، (الشكل 8-28). إنّها تدور بسرعةٍ صغيرةٍ نسبيًّا عندما تكون ذراعاها ممتدتين، وعندما تضع ذراعيها بالقرب من جسمها، فإنّها تبدأ بالدوران فجأةً بسرعةٍ أكبر. ومن تعريف عزم القصور الذاتي، $I = \Sigma mr^2$، يبدو واضحًا عند جذبها ذراعيها قريبًا من محور دوران جسمها يقلّ عزم القصور I. وحيث إنّ الزخم الزاوي $I\omega$ يبقى ثابتًا (نهمل العزم القليل بسبب الاحتكاك)، إذا قلّ I يجب على السرعة الزاوية ω أن تزيد. وإذا أنقصت المتزلجة عزم القصور إلى النصف، فإنّها ستدور بسرعةٍ زاويةٍ مُضاعفة.



الشكل 8-28: متزلجة تقوم بحركة مغزلية (دورانية) على الجليد، موضحة حفظ الزخم الزاوي. ففي (أ) I كبيرة ولكن ω صغيرة؛ وفي (ب) I صغيرة ومن ثَمَّ ω كبيرة.

تطبيق الفيزياء
الحركة المغزلية في التزلج على الجليد والغوص.

التمرين جـ: عندما تسحب المتزلّجة ذراعيها قريبًا. "ينقص عزم قصورها، ولحفظ الزخم الزاوي تزيد سرعتها الزاوية. هل تزداد طاقة حركتها الدورانيّة أيضًا؟ وإذا كان كذلك، فمن أين أتت زيادة الطاقة هذه؟

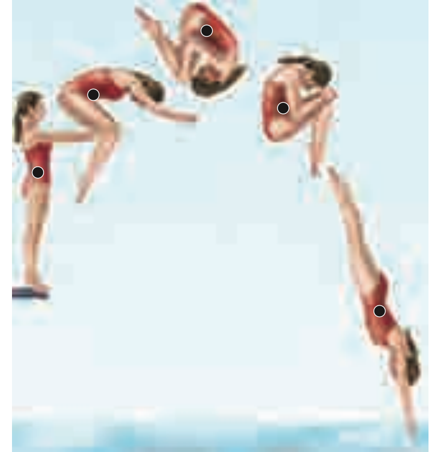
مثال مشابه هو الغطّاس المبيّن في (الشكل 8-29) . إنّ الدفعة عندما تترك لوحة القفز تعطيها زخمًا زاويًا ابتدائيًّا حول مركز كتلتها. وعندما تلف نفسها في وضع القرفصاء، فإنّها تدور مرّةً أو اثنتين بسرعة.

ثمّ تمدّ نفسها ثانية، تزيد عزم قصورها لتتقلّص السرعة الزاوية لقيمةٍ صغيرة، وبعدها تغوص في الماء.

تغيّر عزم القصور من الوضع الممتد إلى وضع القرفصاء يكون بمعامل حوالي $3\frac{1}{2}$.

لاحظ أنّه لأجل حفظ الزخم الزاوي، يجب أن يكون عزم الدوران الكلّيّ صفرًا، ولكنّ القوّة المحصّلة لا تساوي صفرًا بالضرورة. القوّة المحصّلة على الغطّاس (الشكل 8-29) ليست صفرًا (قوّة الجاذبيّة تؤثّر)، أمّا العزم المحصّل فيساوي صفرًا؛ لأنّ قوّة الجاذبيّة تؤثّر في مركز الكتلة.

الشكل 8-29: يدور الغطاس أسرع عندما يضم ذراعيه وساقيه مما لو كانت ممدودة، ويكون الزخم الزاوي محفوظا.



المثال 8-15 **جسم يدور في نهاية خيط متغيّر الطول** كتلةٌ صغيرة m مثبتةٌ في نهاية خيط تدور في دائرةٍ على سطح منضدةٍ عديمة الاحتكاك. يمرّ الطرف الثاني للخيط عبر ثقبٍ في المنضدة (الشكل 8-30). في البداية، تدور الكتلة بسرعة $v_1 = 2.4\,\text{m/s}$ في دائرة نصف قطرها $r_1 = 0.80\,\text{m}$. ثمّ يسحب الخيط ببطءٍ عبر الثقب بحيث ينقص نصف القطر إلى $r_2 = 0.48\,\text{m}$. ما سرعة الكتلة v_2 الآن؟

النهج: ليس هناك عزم دورانٍ محصّل على الكتلة m؛ لأنّ القوّة المتولّدة من الخيط كي تستمر في الحركة تمرّ عبر مركز الكتلة. ولذلك، فإنّ ذراع القوّة يساوي صفرًا. لذا، يمكننا تطبيق قانون حفظ الزخم الزاوي.

الحل: حفظ الزخم الزاوي يعطي

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

كتلتنا الصغيرة هي جسيم عزم قصوره الذاتي حول الثقب هو $I = mr^2$ (البند 8-5، معادلة 8-11)، لذلك لدينا

$$mr_1^2\omega_1 = mr_2^2\omega_2$$

أو

$$\omega_2 = \omega_1\left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right)$$

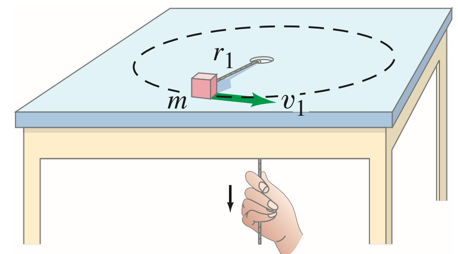
وحيث إن $v = r\omega$، يمكننا كتابة

$$v_2 = r_2\omega_2 = r_2\omega_1\left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right) = r_2\frac{v_1}{r_1}\left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right) = v_1\frac{r_1}{r_2}$$

$$= (2.4\,\text{m/s})\left(\frac{0.80\,\text{m}}{0.48\,\text{m}}\right) = 4.0\,\text{m/s}$$

تزداد السرعة كلّما نقص نصف القطر.

الشكل 8-30: (المثال 8-15)



التمرين د: زادت سرعة الكتلة m في (المثال 8-15) ومن ثَمّ زادت طاقتها الحركيّة. من أين أتت هذه الطاقة؟

المثال 8-16 قدّر **انهيار نجم**

عادةً يكشف الفلكيون عن نجومٍ تدور بسرعةٍ فائقة، تُعرف بالنجوم النيوترونيّة. يُعتقد أنّ هذه النجوم تشكّلت من قلب داخلي لنجمٍ كبيرٍ منهار، نتيجة جاذبيته الذاتية، إلى نجمٍ ذي نصف قطرٍ صغيرٍ جدًّا وبكثافةٍ عاليةٍ جدًّا. قبل الانهيار، افرض أنّ قلب نجمٍ بحجم شمسنا $(R \approx 7 \times 10^5\,\text{km})$ وأنّ كتلته ضعفا كتلة الشمس، ويدور بسرعة دورةٍ واحدةٍ كل عشرة أيام. إذا انهار هذا النجم إلى نجم نيوتروني بنصف قطر 10 km، فماذا ستكون سرعة دورانه؟ افرض أنّ النجم كرةٌ منتظمةٌ في الحالات جميعها.

النهج: بما أنّ النجم معزولٌ (ليس هناك قوى خارجية)، فإنّنا نستطيع تطبيق قانون حفظ الزخم الزاوي لهذه العملية.

الحل: من حفظ الزخم الزاوي¬

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

حيث 1 و 2 تعود إلى ابتدائي (النجم العادي) ونهائي (نجم نيوتروني) على الترتيب. وبفرض عدم ضياع أي كتلة،

$$\omega_2 = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)\omega_1 = \left(\frac{\frac{2}{5}M_1R_1^2}{\frac{2}{5}M_2R_2^2}\right)\omega_1 = \frac{R_1^2}{R_2^2}\omega_1$$

التردد، لذلك $f = \omega/2\pi$:

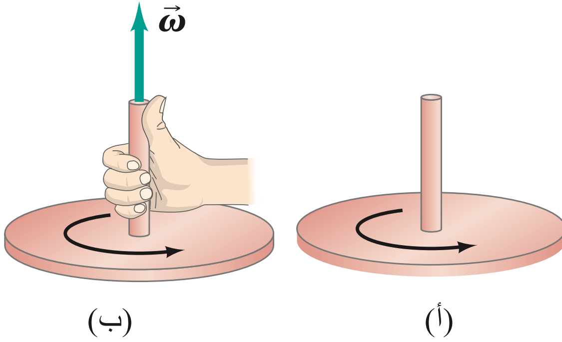
$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{R_1^2}{R_2^2}f_1$$

$$= \left(\frac{7\times10^5\,\text{km}}{10\,\text{km}}\right)^2\left(\frac{1.0\,\text{rev}}{10\,\text{d}(24\,\text{h/d})(3600\,\text{s/h})}\right) \approx 6\times10^3\,\text{rev/s}$$

تطبيق الفيزياء
نجم نيوتروني

* 8-9 الطبيعة المتجهة للكميات الزاوية

حتى الآن، افترضنا المقدار فقط للكميات الزاوية، مثل ω ، α، L. ولكن لها سمة الاتجاهية أيضًا، وسنأخذ الاتجاهات الآن بالحسبان. وفي الواقع، علينا تعريف الاتجاهات للكميات الدورانيّة، ونأخذ أولًا السرعة الزاوية، $\vec{\omega}$.



الشكل 8-31: (أ) دولاب يدور. (ب) قاعدة اليد اليمنى للحصول على اتجاه $\vec{\omega}$.

افترض الدولاب الدوّار المبيّن في (الشكل 8-31أ) . السرعات الخطيّة للجسيمات المختلفة للدولاب تشير إلى الاتجاهات المختلفة كلّها.

إلّا أنّ الاتجاه الوحيد في الفراغ للدوران هو على امتداد محور الدوران عموديًّا على الحركة الفعليّة. لذلك، سنختار محور الدوران ليكون اتجاه السرعة الزاوية. في الحقيقة، لا يزال هناك غموضٌ لأنّ يمكن أنّ تشير إلى أحد الاتجاهين على امتداد محور الدوران (للأعلى أو للأسفل في الشكل8-31أ).

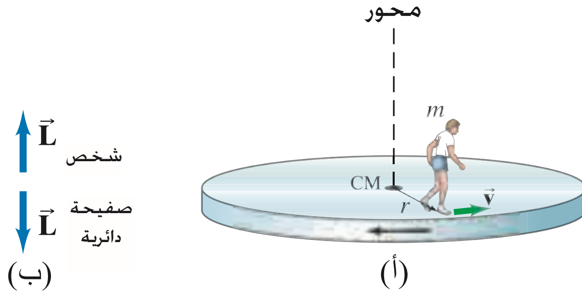
قاعدة اليد اليمنى

إنّ الاصطلاح الذي نستعمله المُسمّى **قاعدة اليد اليمنى** كالتالي: عندما تلتف أصابع اليد اليمنى حول محور الدوران، وتشير إلى اتجاه الدوران، فإنّ الإبهام يشير إلى اتجاه $\vec{\omega}$. وهذا مبيّن في (الشكل 8-31ب) . لاحظ أنّ $\vec{\omega}$ تشير باتجاه تقدّم برغي عندما يلفّ مع اتجاه الدوران. وعليه، إذا كان دوران الدولاب في (الشكل 8-31ب) عكس اتجاه عقارب الساعة، فإنّ اتجاه $\vec{\omega}$ سيكون نحو الأعلى. ولكن إذا دار الدولاب مع عقارب الساعة، فإنّ $\vec{\omega}$ تشير إلى الاتجاه المعاكس، أي نحو الأسفل. لاحظ أنّه لا يوجد جزءٌ من الجسم الدائر يتحرك باتجاه $\vec{\omega}$.إذا ثبت محور الدوران، فيمكن لـ أن تتغيّر فقط من حيث المقدار. ومن ثَمّ $\vec{\alpha} = \Delta\vec{\omega}/\Delta t$ يجب أن يكون على امتداد محور الدوران أيضًا. إذا كان الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة كما في (الشكل 8 - 31أ) ، وكان مقدار ω متزايدًا، فإنّ $\vec{\alpha}$ تشير إلى الأعلى، أمّا إذا كانت ω تتناقص (الدولاب يتباطأ)، فإنّها تشير إلى الأسفل. وإذا كان الدوران مع اتجاه عقارب الساعة، فإن $\vec{\alpha}$ تشير نحو الأسفل. إذن، ω تتزايد، وتشير نحو الأعلى. وعليه، فإنّ ω تتناقص.

الزخم الزاويّ مثل الزخم الخطّي، هو كميةٌ متجهةٌ لجسمٍ متماثل يدور حول التماثل (مثل دولاب، أو أسطوانة، أو طوق، أو كرة)، يمكننا كتابة الزخم الزاوي محور المتجه كـ

$$\vec{\mathbf{L}} = I\vec{\omega} \qquad \textbf{(20-8)}$$

السرعة الزاوية $\vec{\omega}$ (وهكذا أيضًا $\vec{\mathbf{L}}$) تتجه على امتداد محور الدوران بالاتجاه الذي تعطيه قاعدة اليد اليمنى (الشكل 8-31ب).



الشكل 8-32: (أ) شخص يقف على منصة دائرية، في البداية يكون ساكنًا، يبدأ بالسير على الحافة بسرعة v . يفترض أن تكون المنصة مركبة على كرات (بيليات) عديمة الاحتكاك، تبدأ بالدوران بالاتجاه المعاكس، بحيث يبقى الزخم الزاوي الكلّي يساوي صفرًا، كما هو مبيّن في (ب).

إنّ الطبيعة الاتجاهية للزخم الزاويّ يمكن استعمالها لتفسير ظواهر مهمّةٍ (وأحيانًا مدهشة). مثلًا، افترض شخصًا يقف ساكنًا على منصّةٍ دائريّةٍ قابلةٍ للدوران حول محورٍ عديم الاحتكاك يمّر بمركزها (دوّامة بسيطة). إذا بدأ الشخص الآن بالسير عند حافة المنصّة الشكل 8-32أ، فإنّ المنصّة تبدأ بالدوران بالاتجاه المعاكس. لماذا؟ يمكن النظر إلى ذلك من جهة أنّ قَدَمَ الشخص تولّد قوّةً على المنصّة، ومن جهةٍ أخرى (وهذا التحليل الأكثر فائدةً هنا) يُعدّ هذا مثالًا على حفظ الزخم الزاوي. إذا بدأ الشخص بالسير عكس اتجاه عقارب الساعة، فإنّ زخمه الزاوي يشير إلى الأعلى على امتداد محور الدوران (تذكّر كيف عرّفنا اتجاه $\vec{\omega}$ باستعمال قاعدة اليد اليمنى). مقدار الزخم الزاوي للشخص $L = I\omega = (mr^2)(v/r)$ سيكون حيث v سرعة الشخص (نسبةً إلى الأرض وليس إلى المنصّة)، و r البعد عن محور الدوران، و m كتلته، أمّا mr^2 فهو عزم القصور الذاتي للشخص إذا افترضناه جُسيمًا (الكتلة مركزه عند نقطة). المنصّة تدور بالاتجاه المعاكس؛ لذا فإنّ زخمها الزاوي الكلّي الابتدائي يشير إلى النظام (الشخص والمنصة) الذي يساوي صفرًا (الشخص والمنصّة ساكنان) فسوف يبقى صفرًا بعد أن يبدأ الشخص بالحركة. أي أنّ الزخم الزاوي للمنصّة نحو الأسفل (الشكل 8-32ب)، وهكذا يبقى الزخم الزاوي الكلّي يساوي صفرًا. بالرغم من أنّ الشخص يولّد قوّة (وعزمًا) على المنصّة، فالمنصّة تؤثّر بعزم دورانٍ مساوٍ ومعاكس على الشخص. لذلك يكون العزم الدورانيّ المحصّل على النظام المكوّن من الشخص والمنصّة يساوي صفرًا (بإهمال الاحتكاك)، ويبقى الزخم الزاوي الكلّي ثابتًا.



الشكل 8-33 (المثال 8-17).

المثال المفاهيمي 8-17 **دولاب درّاجة يدور مغزليًا**

يمسك معلّم الفيزياء دولاب درّاجة يدور مغزليًا في أثناء وقوفه على منضدةٍ دوارةٍ ساكنةٍ وعديمة الاحتكاك. (الشكل 8-33). ماذا سيحصل إذا قلب المعلم الدولاب فجأةً كي يدور بالاتجاه المعاكس؟

الحل: نفترض أنّ النظام مكوّنٌ من المنضدة، والمعلّم، والدولاب. الزخم الزاوي الكلّي $\vec{\mathbf{L}}$ أولًا رأسيًا نحو الأعلى. وهذا ما يجب أن يكون عليه الزخم الكلّيّ للنظام لاحقًا؛ لأنّ $\vec{\mathbf{L}}$ محفوظٌ حيث ليس هناك عزم دورانٍ خارجي. فإذا كان الزخم الزاوي بُعدّ قلب الدولاب هو $-\vec{\mathbf{L}}$ للأسفل، فإنّ الزخم الزاوي للمعلّم والمنضدة يجب أن يكون $+2\vec{\mathbf{L}}$ لنحو الأعلى. يمكننا استنتاج أنّ المعلم سوف يبدأ بالدوران بالاتجاه نفسه الذي كان يدور فيه الدولاب أولًا.

ملخص

عندما يدور جسمٌ جاسئ حول محورٍ ثابت، فإنّ كلّ نقطةٍ من الجسم تتحرّك في مسارٍ دائري. الخطوط المرسومة قطريًّا من محور الدوران إلى النقاط المختلفة من الجسم تمسح الزاوية θ نفسها في أيّ فترةٍ زمنيّة.

تقاس الزوايا اصطلاحًا **بالراديان**: حيث راديان واحد هي الزاوية المقابلة لقوسٍ طوله يساوي نصف القطر، أو

$$2\pi \text{ rad} = 360°$$
$$1 \text{ rad} \approx 57.3°$$

السرعة الزاوية، ω، تُعرف بمعدّل التغيّر للموقع الزاوي:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad \textbf{(2-8)}$$

أجزاء الجسم الجاسئ الدائر كلّها حول محورٍ ثابتٍ لها السرعة الزاوية نفسها، وعند أيّ لحظة، **التسارع الزاوي**، α يُعرف بمعدّل تغيّر **السرعة الزاوية**:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad \textbf{(3-8)}$$

السرعة الخطّية v والتسارع a لنقطةٍ ثابتةٍ عند مسافة r من محور الدوران يرتبطان بـ ω و α بـ:

$$v = r\omega \quad \textbf{(4-8)}$$
$$a_{\tan} = r\alpha \quad \textbf{(5-8)}$$
$$a_R = \omega^2 r \quad \textbf{(6-8)}$$

حيث $a_{\tan}$ و a_R وهما المركبتان المماسيّة والقطريّة (المركزية) للتسارع الخطّي، على الترتيب:

التردّد f يرتبط بـ ω حيث:

$$\omega = 2\pi f \quad \textbf{(7-8)}$$

وبالزمن الدوري T بـ

$$T = 1/f \quad \textbf{(8-8)}$$

المعادلات التي تصف الحركة الدورانيّة المتسارعة بانتظام (α = ثابت)، لها المظهر نفسه (الشكل) كما في الحركة الخطّيّة بتسارع ثابت:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t, \qquad \theta = \omega_0 t + \tfrac{1}{2}\alpha t^2$$
$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta, \qquad \bar{\omega} = \frac{\omega + \omega_0}{2} \quad \textbf{(9-8)}$$

تشبه ديناميكا الدوران ديناميكا الحركة الخطّيّة. تستبدل القوّة بعزم الدوران τ، الذي يُعرف بحاصل ضرب القوّة في ذراع **العزم** (المسافة العموديّة من محور الدوران إلى خط عمل القوّة):

$$\tau = rF\sin\theta = r_\perp F = rF_\perp \quad \textbf{(10-8)}$$

تُستبدل الكتلة **بعزم القصور الذاتي** I، الذي يعتمد ليس على كتلة الجسم فقط، ولكن على كيفيّة توزيع الكتلة حول محور الدوران أيضًا. التسارع الخطّيّ يُستبدل بالتسارع الزاوي. المكافئ الدوراني لقانون نيوتن الثاني هو

$$\Sigma\tau = I\alpha \quad \textbf{(14-8)}$$

الطاقة الحركيّة الدورانية لجسمٍ يدور حول محورٍ ثابتٍ وبسرعةٍ زاوية

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}I\omega^2 \quad \textbf{(15-8)}$$

لجسمٍ ينتقل ويدور أيضًا الطاقة الحركيّة الكليّة، هي مجموع طاقتي الحركة الانتقاليّة لمركز الكتلة والدورانية للجسم حول مركز الكتلة:

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}Mv_{\text{CM}}^2 + \tfrac{1}{2}I_{\text{CM}}\omega^2 \quad \textbf{(16-8)}$$

ما دام محور الدوران ثابت الاتجاه.

الزخم الزاوي L **لجسم حول محور الدوران** يُعطى بـ

$$L = I\omega \quad \textbf{(18-8)}$$

قانون نيوتن الثاني بدلالة الزخم الزاوي، هو

$$\Sigma\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad \textbf{(19-8)}$$

إذا كان عزم الدوران المحصّل على الجسم يساوي صفرًا، $\Delta L/\Delta t = 0$، فإنّ L= ثابت. هذا هو **قانون حفظ الزخم الزاوي لجسم دائر.**

تُلخّص القائمة التالية الكميات الزاوية (الدورانية) مقارنة بنظيرتها الخطيّة (الانتقاليّة).

انتقال	دوران	العلاقة
x	θ	$x = r\theta$
v	ω	$v = r\omega$
a	α	$a = r\alpha$
m	I	$I = \Sigma mr^2$
F	τ	$\tau = rF\sin\theta$
$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$	$\frac{1}{2}I\omega^2$	
$p = mv$	$L = I\omega$	
$W = Fd$	$W = \tau\theta$	
$\Sigma F = ma$	$\Sigma\tau = I\alpha$	
$\Sigma F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$	$\Sigma\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t}$	

أسئلة

1. أودوميتر درّاجة (يقيس المسافة المقطوعة) مثبتٌ بجانب محور الدولاب ومُصَمَّمٌ لدواليب 27-inch. ماذا يحصل لو استعملته على درّاجة بدواليب 24-inch؟

2. افرض قرصًا يدور بسرعةٍ زاويةٍ ثابتة. هل تملك نقطة عند الحافّة تسارعًا نصف قطري و / أو مُماسيًا؟ إذا زادت السرعة الزاوية للقرص بصورةٍ منتظمة، فهل للنقطة تسارع نصف قطري و/أو مُماسي؟ لأيّ الحالات سوف يتغيّر مقدار أيٍّ من مركبتي التسارع الخطّي؟

3. هل يمكن وصف جسمٍ غير جاسئٍ بقيمةٍ واحدةٍ للسرعة الزاوية ω؟ علّل.

4. هل يمكن لقوّةٍ صغيرةٍ في أيّ حالٍ توليد عزمٍ دورانيٍّ أكبر من قوّةٍ كبيرة؟ فسّر.

5. إذا أثّرت قوّة $\vec{F}$ في جسمٍ بحيث إنّ ذراع العزم يساوي صفرًا، فهل لها على حركة الجسم أيّ أثر؟ فسّر.

6. لماذا يكون أكثر صعوبةً أن تجلس منتصبًا ويداك خلف رأسك من أن تكون ويداك ممدودتان بجانبك؟ إنّ رسمًا تخطيطيًّا قد يساعدك على الإجابة.

7. دراجة ذات -21 سرعة لها سبع عجلاتٍ مسنّنةٍ على الدولاب الخلفي، وثلاثٌ على ذراع الدوّاسة. في أيّ وضعٍ للحركة يكون الدوس أصعب: في مسنّناتٍ خلفيّةٍ صغيرةٍ أو كبيرة؟ لماذا؟ وفي أيّ وضعٍ للحركة يكون الدوس أصعب: في مسنّناتٍ أماميّةٍ صغيرةٍ أو كبيرة؟ لماذا؟

8. الثدييات التي تعتمد على سرعتها في الجري تملك سيقانًا نحيلة في أسفلها، في حين يتركز اللحم والعضل عاليًا قريبًا من الجسم (الشكل 8-34). اعتمادًا على ديناميكا الحركة الدورانيّة، فسّر لماذا يكون توزيع الكتلة هذا مفيدًا أكثر؟



الشكل 8-34: (السؤال 8) الغزال

الشكل 8-35: (السؤال 9)



9. الحبل المشدود (الشكل 8-35)، ذراعًا طويلًا ضيّقًا؟

10. إذا كانت القوّة المحصّلة على جسم تساوي صفرًا، فهل يكون عزم الدوران أيضًا صفرًا؟ وهل تكون القوّة المحصّلة صفرًا إذا كان عزم الدوران المحصّل صفرًا أيضًا؟

11. منحدران لهما الارتفاع نفسه، ولكن بزاويتين مختلفتين مع الأفق. دحرجت كرة الفولاذ نفسها على كلٍّ منهما. على أيٍّ من المنحدرين ستكون سرعتها أكبر عند النهاية؟ فسّر ذلك.

12. كرتان مصمتتان بدأتا بالتدحرج في اللحظة نفسها (من السكون) على منحدر. إحدى الكرتين لها ضعفا الكتلة وضعفا نصف القطر التي للآخرى. أيّهما تصل إلى قاعدة المنحدر أولًا؟ أيّهما لها سرعةٌ أكبر هناك؟ وأيّهما لها طاقةٌ حركيّةٌ أكبر عند القاعدة؟

13. كرةٌ وأسطوانةٌ لهما نصف القطر نفسه، والكتلة نفسها. بدأتا بالحركة من السكون أعلى منحدر. أيّهما تصل إلى القاعدة أولًا؟ أيّهما لها طاقةٌ حركيّةٌ أكبر عند القاعدة؟ أيّهما لها طاقةٌ حركيّةٌ دورانيّةٌ أكبر؟

14. ندّعي أنّ الزخمين اللحظيّ والزاويّ محفوظان. والآن معظم الأجسام المتحرّكة أو التي تدور تبطئ أخيرًا ثُمّ تتوقّف. فسّر ذلك.

15. لو كانت هناك هجرةٌ للناس نحو خطّ الاستواء على الأرض، فكيف سيؤثّر ذلك في طول اليوم؟

16. هل تستطيع الغطّاسة في (الشكل 8-29) أن تصل إلى هذه النتيجة من غير أن يكون لها أيّ حركةٍ دورانيّةٍ ابتدائيّةٍ عند مغادرتها المنصّة؟

17. عزم القصور الذاتيّ لقرصٍ مصمتٍ يدور حول محورٍ خلال مركزٍ كتلته هو $\frac{1}{2}MR^2$ (الشكل 8-21ج). افرض أنّ المحور يمرّ بنقطةٍ عند حافّة القرص، فهل سيكون عزم القصور الذاتّي نفسه، أكبر أم أقل؟

18. افرض أنّك تجلس على مقعدٍ وتمسّك بكتلة 2-kg في كلٍّ من يديك الممدودتين. إذا اسقطت الكتلتين فجأة، فهل ستزيد سرعتك الزاوية، تقل أم تبقى ثابتة؟ فسّر ذلك.

19. كرتان تبدوان متماثلتين ولهما الكتلة نفسها، ولكن إحداهما مجوّفةٌ والأخرى مصمتة. صف تجربةً لتحديد كلٍّ منهما.

*20. في أيّ اتّجاهٍ تكون السرعة الزاوية للأرض في أثناء دورانها يوميًّا حول محورها؟

*21. السرعة الزاوية لدولاب يدور على محورٍ أفقيٍّ تشير إلى الغرب. في أيّ اتّجاهٍ تكون السرعة الخطيّة لنقطةٍ على قمّة الدولاب؟ إذا أشار التسارع الزاوي نحو الشرق، فصف التسارع المماسيّ للنقطة المذكورة. هل تتزايد السرعة الزاوية أم تتناقص؟

*22. افرض أنّك تقف عند حافّة منضدةٍ كبيرةٍ تدور بحرّية. ماذا يحدث إذا سرت نحو المركز؟

*23. لاعب يمكن أن يقفز في الهواء للإمساك بكرة، ثم يقذفها بسرعة. عندما يرمي الكرة، يدور الجزء العلوي من جسمه. إذا نظرت بسرعة فسوف تلاحظ أنّ وركيه وساقيه تدور في الاتّجاه المعاكس (الشكل 8-36). فسّر ذلك.



الشكل 8-36: (السؤال 23) . لاعب في الهواء يرمي الكرة.

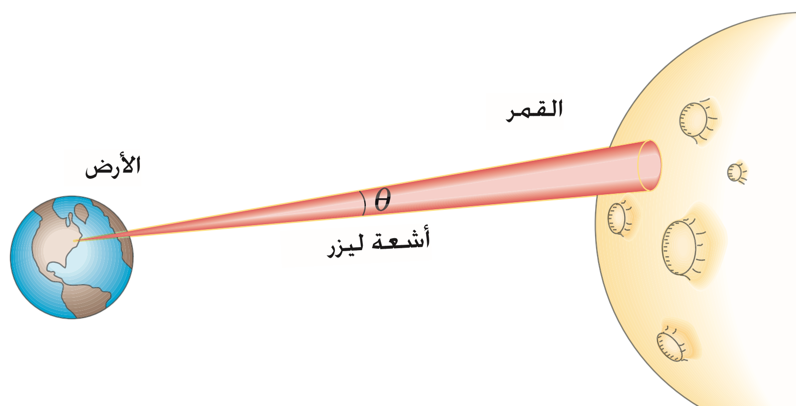
*24. على أساس قانون حفظ الزخم الزاوي، ناقش لماذا يكون لطائرة الهيليكوبتر أكثر من مروحة. اشرح طريقةً أو أكثر لكيفيّة عمل المروحة الثابتة للمحافظة على المروحة مستقرّة.

8-1 الكميات الزاوية

.1 (I) عبّر عن الزوايا التالية بالراديان: (أ) °30 (ب) °57 (جـ) °90 (هـ) °360 (د) °420 اعطِ النتيجة عدديًّا، وكنسبةٍ من π.

.2 (I) يحدث الكسوف والخسوف على الأرض نتيجة تطابقٍ مدهش. احسب القطر الزاوي (بالراديان) للشمس والقمر كما تبدو من الأرض، مستعينًا بلمعلومات الموجودة على صفحة الغلاف الأمامية.

.3 (I) يوجه شعاع ليزر نحو القمر على بعد 380,000 km من الأرض. ينحرف الشعاع بزاوية θ (الشكل 8-37) 1.4×10^{-5} rad . ما قطر البقعة التي يعملها على القمر؟



الشكل **8-37**: (المسألة 3) .

.4 (I) تدور شفرات جهاز المزج بمعدّل 6500 rpm. عند إيقاف المحرّك خلال العمل، تبطىء الشفرات لتتوقّف خلال 3.0 s. ما التسارع الزاوي لتباطؤ الشفرات؟

.5 (II) يدحرج طفلٌ كرةً على أرض الغرفة لطفلٍ آخر على بعد 3.5 m. إذا عملت الكرة 15.0 دورة، فما قطرها؟

.6 (II) درّاجة قطر عجلاتها 68 cm، سارت 8.0 km. كم عدد دورات عجلات الدراجة؟

.7 (II)(أ) دولاب شحذٍ قطره 0.35 m، يدور بسرعة 2500 rpm. احسب سرعته الزاوية بـ (.rad/s). ما السرعة الخطّية والتسارع لنقطةٍ على حافّة عجلة؟

.8 (II) دوّامة تدور لتكمل دورةً واحدةً في 4.0 s (الشكل 8-38). (أ) ما السرعة الخطيّة لطفلةٍ تجلس على بعد 1.2 m من المركز؟ (ب) ما تسارعها؟ (اعطِ مركبات).



الشكل **8-38**: (المسألة 8)

.9 (II) احسب السرعة الزاوية للأرض: (أ) في مسارها حول الشمس. (ب)حول محورها ذاتها.

.10 (II) ما السرعة الخطّيّة لنقطة: (أ) عند خط الاستواء. (ب) عند الدائرة القطبية الشمالية (خط عرض 66.5° N). (جـ) عند خط عرض 45° N، بسبب دوران الأرض.

.11 (II) بأيّ سرعة (بـ rpm) يجب على جهاز طردٍ مركزيٍّ أن يدور بحيث إنّ جُسيمًا على بعد 7.0 cm من محور الدوران يكون تسارعه 100,000 *g*'s؟

.12 (II) عجلة قطره 70-cm يتسارع بانتظامٍ حول محوره من 130 rpm إلى 280 rpm في 4.0 s. حدّد: (أ) تسارعه الزاوي. (ب) المركبتين القطرية والماسية للتسارع الخطّيّ لنقطةٍ عند الحافّة على بعد 2.0 s من بداية التسارع.

.13 (II) طاولةٌ دوّارةٌ نصف قطرها R_1، تُدار بواسطة حزامٍ مطّاطيٍّ نصف قطره R_2 يتلامسان من حافتيهما الخارجيتين. ما النسبة بين سرعتيهما الزاويتين ω_1/ω_2 ؟

.14 (III) في السفر إلى القمر، يضع روّاد (أبولو) أنفسهم في دورانٍ بطيءٍ ليتعرّضوا لطاقة الشمس بالتساوي. في بداية رحلتهم يتسارعون من السكون إلى 1.0 دورة كلّ دقيقةٍ لمدّة 12-min. يمكن افتراض سفينة الفضاء أسطوانةً قطرها 8.5 m . حدد: (أ) التسارع الزاوي. (ب) المركبتين القطرية والماسية للتسارع الخطّيّ لنقطة على سطح المركبة على بعد 5.0 min من بداية التسارع.

8-2 و 8-3 تسارع زاوي ثابت؛ التدحرج

.15 (I) جهاز طردٍ مركزيٍّ يتسارع بانتظامٍ من السكون إلى 15,000 rpm في 220 s. كم عدد الدورات التي دارها الجهاز خلال هذا الزمن؟

.16 (I) محّرك سيارةٍ يتباطأ من 4500 rpm إلى 1200 rpm في 2.5 s احسب: (أ) التسارع الزاويّ.

(ب) عدد الدورات الكلّيّ التي يعملها المحرّك خلال ذلك.

.17 (I) يختبر الطيّارون التوتر الناتج من قيادة الطائرات النفاثة السريعة في جهاز طردٍ "مركزيٍّ للإنسان" الذي يستغرق 1.0 min لعمل 20 دورة قبل الوصول إلى سرعته النهائية. (أ) ماذا كان تسارعه الزاوي (بفرض أنّه ثابت)، و(ب)؟ (ب) ما السرعة الزاوية النهائية بـ (rpm) ؟

.18 (II) دولاب قطره 33 cm يتسارع بانتظام من 240 rpm إلى 360 rpm في 6.5 s. ما المسافة التي تقطعها نقطةٌ على حافّة الدولاب خلال هذا الزمن؟

.19 (II) أُطفئت مروحة تبريد عندما كانت تدور بسرعة 850 rev/min. دارت 1500 دورة قبل أن تتوقف. (أ) كم كان التسارع الزاوي بفرض أنّه كان ثابتًا؟ (ب) كم استغرقت المروحة حتى توقفت؟

.20 (II) دولابٌ مطاطيٌّ صغيرٌ يُستخدم لتشغيل دولابٍ أكبر لعمل الفخّار. ويوضعان بحيث تتلامس حافتاهما الدائريتان. نصف قطر الدولاب الصغير 2.0 cm، ويتسارع بمعدل 7.2 rad/s^2 ملامسًا دولاب الفخّار (نصف قطر 25.0 cm) من غير انزلاق. احسب: (أ) التسارع الزاوي لدولاب الفخّار. (ب) الزمن اللازم لدولاب الفخّار كي يصل إلى سرعته المطلوبة 65 rpm.

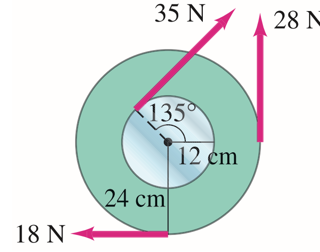
21. (II) دواليب سيّارةٍ تعمل 65 دورةً عندما تخفض السيّارة سرعتها بانتظام من 95 km/h إلى 45 km/h . قطر الدولاب 0.80 m. (أ) كم كان التسارع الزاويّ للدولاب؟ (ب) إذا استمرت السيّارة بالتباطؤ بالمعدّل نفسه، فما الزمن الإضافيّ الذي يلزمها للتوقّف!

4-8 عزم الدوران

22. (I) راكبة درّاجةٍ كتلتها 55-kg تضع وزنها كلّه على كلّ دوّاسةٍ عند صعودها تلّة. تدور الدوّاسات في دائرةٍ نصف قطرها 17 cm. (أ) ما أكبر عزمٍ دوراني تنتجه؟ (ب) كيف يمكنها الحصول على عزمٍ أكبر؟

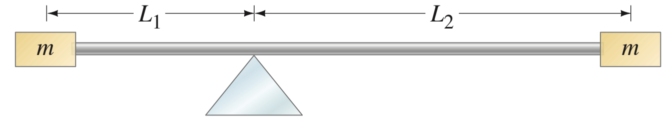
23. (I) يؤثّر شخصٌ بقوّة 55 N في طرف باب عرضه 74 cm. ما مقدار عزم الدوران: (أ) إذا أثرت القوة عموديًّا في الباب؟ (ب) إذا أثّرت القوّة بزاوية 45° مع وجه الباب؟

24. (II) احسب العزم المحصّل حول محور الدولاب المبيّن في (الشكل 8-39). افرض أنّ عزم احتكاكٍ مقداره 0.40 m.N يعاكس الحركة.



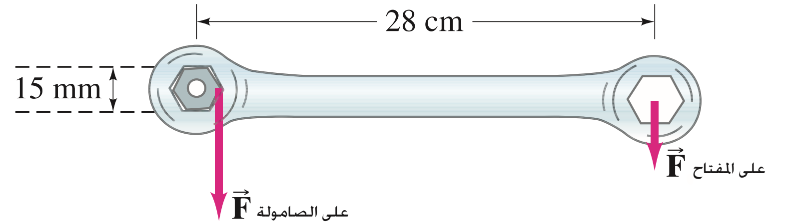
الشكل 8-39: (المسألة 24)

25. (II) كتلتان مقدار كلٍّ منهما m مثبتتان عند نهايتي قضيبٍ مهمل الكتلة ومركّزٍ كما يبدو في (الشكل 8-40) . أولًا ثبّت القضيب في وضعٍ أفقي، ثم أفلت. احسب مقدار العزم المحصّل على هذا النظام واتّجاهه.



الشكل 8-40:(المسألة 25).

26. (II) تحتاج الصامولات على الرأس الأسطوانيّ لمحرّك إلى عزم $88\,m\cdot N$ لتثبيتها. إذا كان طول مفتاح الربط 28 cm، فما القوة العموديّة على المفتاح التي يجب على الميكانيكي التأثير بها عند نهاية المفتاح؟ إذا كانت الصامولة السداسيّة قطرها 15 mm، فقدّر القوّة المؤثّرة عند كلّ نقطةٍ من النقاط الستة بواسطة المفتاح، (الشكل 8-41).



الشكل 8-41: (المسألة 26)

5-8 و6-8 ديناميكا الحركة الدورانية

27. (I) حدّد عزم القصور الذاتيّ لكرةٍ كتلتها 10.8-kg ونصف قطرها 0.648 m إذا كان محور الدوران خلال مركزها.

28. (*I*) احسب عزم القصور الذاتيّ لدولاب درّاجة قطره 66.7 cm وكتلته 1.25 kg. كتلة المحور يمكن إهمالها (لماذا)؟

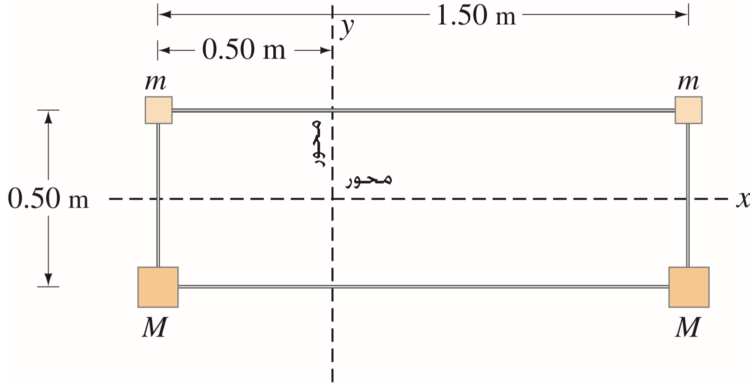
29. (II) كرةٌ صغيرةٌ كتلتها 650-g في نهاية قضيب خفيف، أديرت في دائرةٍ أفقيةٍ نصف قطرها 1.2 m. احسب: (أ) عزم القصور الذاتيّ للكرة حول مركز الدائرة. (ب) العزم اللازم للمحافظة على دوران الكرة بسرعةٍ زاويةٍ ثابتة إذا كانت مقاومة الهواء تؤثّر بقوّة 0.020 N في الكرة؟ أهمل عزم القصور للقضيب، وكذلك مقاومة الهواء.

30. (II) صانعة فخّارٍ تشكل قدراً (زبدية) على عجلة الفخّار التي تدور بسرعةٍ زاوية ثابتة (الشكل 8-42). قوّة الاحتكاك بين يديها والطين تساوي 1.5 N بصورةٍ كلية. (أ) ما مقدار عزمها على الدولاب إذا كان قطر القدر 12 cm؟ (ب) ما الوقت الذي يلزم للدولاب للتوقّف إذا كان العزم الوحيد المؤثّر ناتج من يديها؟ السرعة الزاوية الابتدائيّة للدولاب 1.6 rev/s وعزم القصور الذاتيّ للدولاب والقدر $0.11\ kg\cdot m^2$.



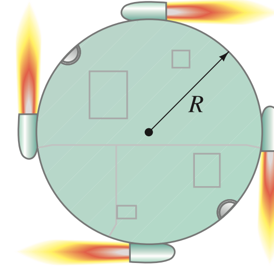
الشكل 8-42: المسألة 30.

31. (II) احسب عزم القصور الدورانيّ لمجموعة الأجسام النقطيّة في (الشكل 8-43) حول (*أ*) المحور العامودي. (ب) المحور الأفقي. مفترض أنّ $m = 1.8$ kg و $M = 3.1$ kg، وقد وصلت الأجسام معًا بأسلاك معدنيّة خفيفة. والإطار مستطيلٌ ويُقسم في المنتصف بواسطة المحور الأفقي. (جـ) حول أيّ محورٍ ستكون مسارعة هذا النظام أصعب؟



32. (II) جزيء أكسجين، يتكوّن من ذرّتي أكسجين كتلتهما الكليّة 5.3×10^{-26} kg وعزم قصورهما الذاتيّ حول محورٍ عموديٍّ على الخطّ الواصل بين الذرّتين وفي منتصف المسافة بينهما يساوي $1.9 \times 10^{-46}\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$. من هذه البيانات، قدر البعد بين الذرّتين.

33. (II) للحصول على قمرٍ صناعيٍّ أسطوانيٍّ منتظمٍ يدور بالمعدّل المطلوب، يطلق المهندسون أربعة صواريخ مماسة كما يبين (الشكل 8-44) إذا كانت كتلة القمر الصناعي 3600 kg، ونصف قطره 4.0 m، فما القوّة الثابتة لكلّ صاروخٍ إذا كان على القمر الصناعيّ الوصول إلى 32 rpm في 5.0 min؟



نهاية عرض القمر الصناعي الاسطواني

الشكل 8-44: (المسألة 33)

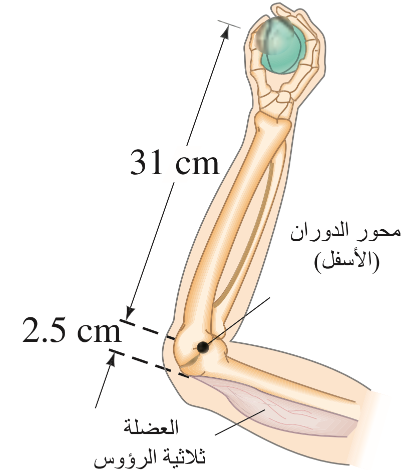
34. (II) دولاب شحذٍ من أسطوانةٍ منتظمةٍ نصف قطرها 8.50 cm وكتلتها 0.580 kg. احسب: (أ) عزم قصورها الذاتيّ حول مركزها. (ب) العزم الدورانيّ المؤثّر اللازم للتسارع من السكون إلى 1500 rpm في 5.00 s إذا كان من المعروف أنّه يتباطأ من 1500 rpm إلى السكون في 55.0 s.

35. (II) لاعب كرةٍ ليّنةٍ يلوّح المضرب مسارعًا إيّاه من السكون إلى 3.0 rev/s في زمن 0.20 s. قرّب المضرب إلى قضيبٍ منتظمٍ كتلته 2.2-kg وطوله 0.95 m. احسب العزم الذي يؤثّر فيه اللاعب في نهاية المضرب.

36. يدفع شابٌّ ماسيًا دوّامةً تعمل يدويًّا ويسارعها من السكون إلى 15 rpm في 10.0 s. افرض أنّ الدوّامة هي قرصٌ منتظمٌ نصف قطره 2.5 m وكتلته 760 kg وهناك طفلان (كتلة كل منهما 25 kg) يجلسان متقابلين عند حافتها. احسب عزم الدوران اللازم للحصول على هذا التسارع مع إهمال الاحتكاك. ما القوّة اللازمة عند الحافة؟

37. (II) جهاز طردٍ مركزيٍّ يدور بـ 10,300 دورة / دقيقة يفصل عن التيّار الكهربائيّ وبانتظامٍ يصل إلى السكون بواسطة عزم قوّة احتكاك $1.20\,\text{m}\cdot\text{N}$. إذا كانت كتلة الدوّار 4.80 kg ويمكن تقريبه كأسطوانة مصمتة بنصف قطر 0.0170 m، كم دورةٍ يلفّ الدوّار قبيل أن يتوقّف، وكم من الوقت سوف يستغرق؟

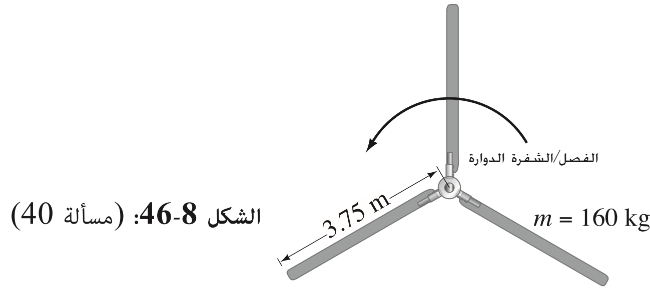
38. (II) يسارع الساعد في (الشكل 8-45)كرةً كتلتها 3.6-kg بمعدّل $7.0\ \text{m/s}^2$ بواسطة العضلة ثلاثية الرؤوس، كما هو مبين. احسب: (أ) عزم الدوران اللازم. (ب) القوّة التي على العضلة توليدها. اهمل كتلة الساعد.



الشكل 8-45: (المسائل 38 و 39).

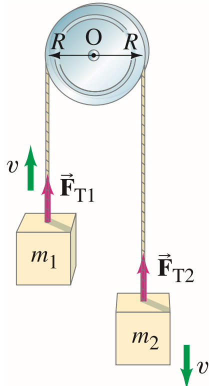
39. (II) افرض أنّ كرةً كتلتها 1.00-kg قذفت بتأثير مقدّمة اليد التي تدور حول مفصل الكوع بواسطة العضلة ذات الرؤوس الثلاثيّة (الشكل 8-45). تتسارع الكرة بانتظامٍ من السكون حتى 10.0 m/s في 0.350 s، حيث تُقذف عندها. احسب: (أ) التسارع الزاويّ للذراع. (ب) القوّة اللازمة من العضلة ثلاثيّة الرؤوس. افرض أنّ كتلةً مقدّمة الذراع 3.70 kg وتدور كقضيب منتظم حول محور عند نهايته .

40. (II) يمكن اعتبار نَصْل مروحة هيليوكوبتر قضيبًا طويلًا رقيقًا، كما في (الشكل 8-46). (أ) إذا كان طول كلّ نصْلٍ من الثلاثة في الطائرة 3.75 m وكتلته 160 kg، فاحسب عزم القصور الذاتيّ للنصول الثلاثة حول محور الدوران . (ب) كم العزم الذي على المحرّك بذله لجعل النصول تصل السرعة 5.0 rev/s في 8.0 s؟



الشكل 8-46: (مسألة 40)

41. (III) تتكوّن آلة أتوود من كتلتين m_1 و m_2 متصلتين بحبلٍ غير مرنٍ مهمل الكتلة ويمرّ حول بكرة، (الشكل 8-47). إذا كان نصف قطر البكرة R وعزم قصورها I حول محورها، حدّد تسارع الكتلتين m_1 و m_2 وقارن مع الوضع عند إهمال عزم القصور الذاتي للبكرة. [تنويه: الشدان F_{T1} , F_{T2} ليسا متساويين. سبق مناقشة هذا الوضع في مثال 4-13، بفرض $I = 0$ للبكرة].



الشكل 8-47: (المسائل 41 و 49).

42. (III) رامي مطرقة يسارع المطرقة (كتلتها 7.30 kg) من السكون خلال أربع دوراتٍ كاملةٍ ويفلتها بسرعة 28.0 m/s. بفرض أنّ معدّل الزيادة ثابت في السرعة الزاوية، ونصف قطر المسار الدائريّ الأفقيّ 1.20 m، احسب: (أ) التسارع الزاوي. (ب) التسارع (الخطي) المماسي. (ج) التسارع المركزيّ قبيل الإفلات. (د) القوّة المحصّلة المؤثّرة من اللاعب في المطرقة قبيل الإفلات. (هـ) زاوية هذه القوة بالنسبة إلى نصف قطر الحركة الدائرية.

8-7 الطاقة الحركية الدورانية

43. (I) دوّار جهاز طرد مركزي عزم قصوره الذاتي $3.75 \times 10^{-2}\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$. كم الطاقة اللازمة لنقله من السكون إلى 8250 rpm؟

44. (II) محرك سيارة يولد عزم دوران $280\ \text{m}\cdot\text{N}$ عند 3800 rpm. احسب القدرة بالواط وبالحصان.

45. (II) كرة (بولينج) كتلتها 7.3 kg ونصف قطرها 9.0 cm تتدحرج من غير انزلاق بسرعة 3.3 m/s. احسب طاقتها الحركيّة الكليّة.

.46 (II) قدّر الطاقة الحركيّة للأرض بالنسبة إلى الشمس كمجموع لحدّين، (أ) ذلك الذي يعود إلى الدوران اليومي حول محورها، (ب) ذلك الذي يعود إلى دورانها السنويّ حول الشمس. [افرض أنّ الأرض كرةٌ منتظمةٌ كتلتها 6.0×10^{24} kg ونصف قطرها 6.4×10^{6} m وبعدها عن الشمس 1.5×10^{8} km]

.47 (II) دوّامة كتلتها 1640 kg ونصف قطرها 7.50 m. كم الشغل الصافي اللازم لتسارعها من السكون لمعدّل 1.00 دورة كلّ 8.00 s؟ افرض أنّها أسطوانيّة مصمتة.

.48 (II) كرةٌ نصف قطرها 20.0 cm وكتلتها 1.80 kg تبدأ من السكون وتتدحرج من غير انزلاق على منحدرٍ طوله 10.0 m، وبميل بزاوية 30.0°. (أ) احسب سرعتها الانتقاليّة والدورانيّة عند وصولها إلى قاعدة المنحدر (ب) ما النسبة بين الطاقة الحركيّة الانتقاليّة إلى الدورانية عند القاعدة؟ تجنّب وضع أرقامٍ حتى تصل إلى النهاية ثم تستطيع إجابة: (جـ) هل إجاباتك في (أ) و (ب) تعتمد على نصف قطر الكرة أم كتلتها؟

.49 (II) كتلتان $m_1 = 18.0$ kg و $m_2 = 26.5$ kg متصلتان بحبلٍ يمرّ حول بكرةٍ كما في (الشكل 8-47). البكرة هي أسطوانةٌ نصف قطرها 0.260 m وكتلتها 7.50 kg. ابتداء m_1 على الأرض، و m_2 ساكنة على ارتفاع 3.00 m فوق سطح الأرض. حدّد سرعة m_2 قبيل اصطدامها بالأرض إذا أفلتنا هذا النظام، مستعملًا قانون حفظ الطاقة. ومفترضًا أنّ البكرة عديمة الاحتكاك.

.50 (III) عمود (سارية) طوله 2.30-m متّزنٌ عموديًّا على رأسه. بدأ بالسقوط ونهايته السفليّة لا تنزلق. ماذا ستكون سرعة نهايته العلويّة قبيل اصطدامه بالأرض؟[تنويه: استخدم حفظ الطاقة]

8-8 الزخم الزاوي

.51 (I) ما قيمة الزخم الزاوي لكرةٍ كتلتها 0.210-kg تدور في نهاية خيطٍ رفيع في دائرة نصف قطرها 1.10 m بسرعة زاوية 10.4 rad/s؟

.52 (I) (أ) ما الزخم الزاوي لدولاب شحذٍ أسطواني كتلته 2.8 kg ونصف قطره 18 cm يدور بـ 1500 rpm؟ (ب) ما عزم الدوران اللازم لإيقافه في 6.0 s؟

.53 (II) شخص يقف على منصّة دوّارة واضعًا يديه على جانبيه، تدور المنصة بسرعة 1.30 rev/s. إذا رفع يديه إلى وضع أفقي، (الشكل 8-48)، تقل سرعة دورانه إلى 0.80 rev/s (أ) لماذا؟ (ب) ما نسبة تغيّر عزم قصوره الذاتي؟



الشكل **8-48**: (المسألة 53)

.54 (II) غوّاصة (كالمبين في الشكل 8-29) تستطيع تغيير عزم قصورها الذاتي بمعامل قدره 3.5 عندما تتغيّر من وضع الاستقامة إلى وضع القرفصاء. إذا عملت 2.0 دورة في 1.5 s في وضع القرفصاء، فما سرعتها الزاوية (rev/s) في وضع الاستقامة؟

.55 (II) متزلّجة على الجليد تستطيع زيادة سرعتها المغزلية من سرعة ابتدائية قدرها 1.0 دورة كل 2.0 s إلى معدل نهائي قدره 3.0 rev/s، إذا كان عزم قصورها الذاتي الابتدائي $4.6\ kg.m^2$، فما عزم قصورها النهائي؟ كيف يمكنها فيزيائيًّا عمل هذا التغيير؟

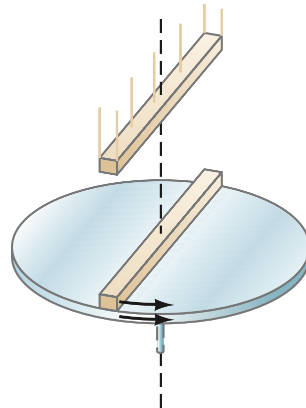
.56 (II) دولاب فخاري يدور حول محور رأسي عبر منتصفه بتردّد 1.5 rev/s. يمكن اعتبار الدولاب قرصًا منتظمًا كتلته 5.0 kg وقطره 0.40 m. بعد ذلك يرمي الدولاب الفخاري قطعة من الطين كتلتها 3.1-kg شكلها كقرصٍ منبسط نصف قطره 8.0 cm عند منتصف الدولاب الدوّار. فما تردّد الدولاب بعد التصاق قطعة الطين به؟

.57 (II) (أ) ما الزخم الزاوي لمتزلّجة على الجليد تدور بسرعة 3.5 rev/s ويداها قريبتان من جسمها، ولو فرضنا أنّها أسطوانة منتظمة بارتفاع 1.5 m ونصف قطر 15 cm وكتلة 55 kg؟ (ب) ما عزم الدوران اللازم لإبطائها حتى تتوقف في 5.0 s بفرض أنّها لم تحرّك ذراعيها؟

.58 (II) احسب الزخم الزاوي للأرض: (أ) حول محور دورانها بفرض أنّها كرويّة (ب) في مسارها حول الشمس (افترض أن الأرض جسيمٌ يدور حول الشمس). كتلة الأرض 6.0×10^{24} kg ونصف قطرها 6.4×10^{6} m وعلى بعد 1.5×10^{8} من الشمس.

.59 (II) قرصٌ أسطوانيٌّ ساكنٌ، عزم قصوره الذاتي I، أُسقط فوق قرصٍ مماثلٍ يدور بسرعة زاوية ω.افرض عدم وجود عزومٍ خارجيّة، ما السرعة الزاوية النهائية للمجموعة من القرصين؟

.60 (II) قرصٌ منتظمٌ يدور بسرعة 2.4 rev/s حول محورٍ عديم الاحتكاك. قضيب غير دوّار، كتلته تساوي كتلة القرص وطوله يساوي قطر القرص، أُسقط فوق القرص الدائر، (الشكل 8-49). فأخذا بالدوران معًا حول المحور نفسه ومركزاهما متطابقان. فما التردّد الزاوي بـ rev/s للمجموعة؟



الشكل **8-49**: (المسألة 60).

.61 (II) يقف شخصٌ كتلته 75 kg عند منتصف منصّةٍ دوامة نصف قطرها 3.0 m وعزم قصورها الذاتي $920\ kg.\ m^2$. تدور المنصّة من غير احتكاكٍ بسرعةٍ زاوية 2.0 rad/s. بدأ الشخص بالسير نحو حافة المنصّة. احسب: (أ) السرعة الزاوية عند وصول الشخص إلى الحافّة. (ب) الطاقة الحركيّة الدورانيّة للمنصّة والشخص قبل وبعد أن يسير.

.62 (II) منصّة دوّامة قطرها 4.2-m تدور من غير احتكاك بسرعةٍ زاوية 0.8 rad/s عزم قصورها الذاتي $1760\ kg.\ m^2$. يقف أربعة أشخاص كتلة كلٍّ منهم 65 kg على الأرض، وفجأةً يقفزون إلى حافّة المنصّة. ما السرعة الزاوية للمنصّة الآن؟ ماذا لو كان الأشخاص أصلًا على المنصّة، ثم قفزوا عنها قطريًّا بالنسبة إليها؟

.63 (II) افرض أنَّ شمسنا انهارت إلى قزمٍ أبيض، ففقدت في هذه العمليّة نصف كتلتها، وأصبحت تلتفّ بنصف قطرٍ يعادل 1.0% من نصف قطرها الحالي. بفرض أنّ الكتلة الضائعة لم تحمل معها زخمًا زاويًا، ما معدّل الدوران الجديد للشمس؟ (خذ الزمن الدوري لتيار الشمس حوالي 30 يومًا). ماذا ستكون طاقتها الحركيّة النهائيّة بدلالة طاقتها الحركية الحالية؟

.64 (II) قد تتضمّن الأعاصير رياحًا بسرعة 120 km/h عند حافّتها الخارجيّة. اعمل تقديرًا لكلٍّ من: (أ) الطاقة. (ب) الزخم الزاوي لهذا الإعصار بفرض أن الإعصار تقريبًا أسطوانة منتظمة مصمتة من الهواء (كثافة $1.3\ kg/m^3$) نصف قطرها 100 km وارتفاعها 4.0 km.

.65 (III) كُويكبٌ كتلته 1.0×10^5 kg يسير بسرعة 30 km/s بالنسبة إلى الأرض، يصطدم بالأرض مماسيًا عند خط الاستواء وباتجاه دوران الأرض. استخدم الزخم الزاوي لتقدير نسبة التغيّر في السرعة الزاوية للأرض نتيجة التصادم.

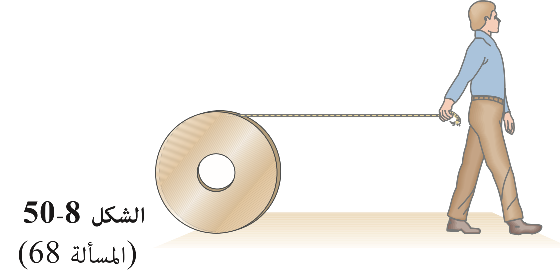
*9-8 الكميات الزاوية كميات متجهة

.66* (II) يقف شخصٌ على منصّةٍ دوّارة ساكنة، ابتداءً يمكنها أن تدور من غير احتكاك. وعزم القصور للشخص والمنصة I_P. يحمل شخصٌ دولاب درّاجة يدور على محورٍ أفقي. الدولاب له عزم قصور ذاتي I_W وسرعة زاوية ω_W. ماذا ستكون السرعة الزاوية للمنصّة ω_P إذا حرّك الشخص محور الدولاب بحيث أصبح يشير: (أ) عموديًّا نحو الأعلى؟ (ب) بزاوية $60°$ مع العمودي؟ (جـ) عموديًّا نحو الأسفل؟

.67* (III) افرض أنّ شخصًا كتلته 55-kg يقف عند حافّةٍ دوّامةٍ قطرها 6.5-m محمولةً على بليّاتٍ عديمة الاحتكاك وعزم قصورها الذاتي $1700\ kg \cdot m^2$. ساكنة في البداية. ولكن عندما يبدأ الشخص بالركض بسرعة 3.8 m/s (بالنسبة إلى المنصة) على طول الحافّة، فإنّ المنصّة تبدأ بالدوران بالاتجاه المعاكس. احسب السرعة الزاوية للمنصة.

مسائل عامة

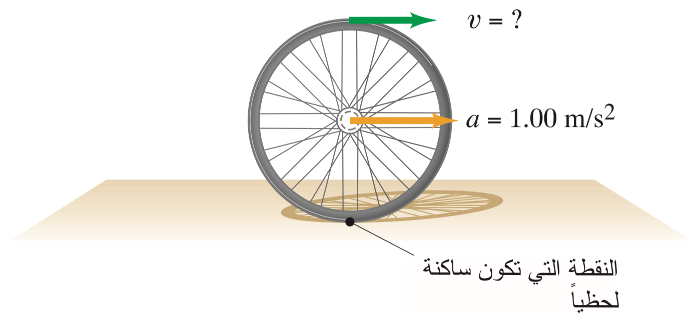
.68 ملفٌّ كبيرٌ من الحبل يتدحرج على الأرض، بحيث إن نهاية الحبل في الجزء العلوي من الملفّ والنهاية الأخرى في يد شخصٍ يسير مسافة L ممسكًا بها، (الشكل 8-50). يتدحرج الملفّ خلف الشخص من غير انزلاق. كم طول الحبل الذي ينحلُّ من الخلف؟ ما المسافة التي يتحرّكها مركز الكتلة الملف؟



الشكل **8-50**
(المسألة 68)

.69 يدور القمر حول الأرض بحيث يواجه الجانب نفسه من الأرض. حدّد نسبة الزخم الزاوي لبرم القمر (حول محوره) إلى الزخم الزاوي المداري له (افترض في هذا الجزء أنّ القمر جُسيمٌ يدور حول الأرض).

.70 دولاب دراجةٍ يتسارع من السكون بمعدّل $1.00\ m/s^2$. ما سرعة حركة نقطةٍ عند قمّة الدولاب (قطره = 68 cm) بعد 3.0 s؟ [تنويه: عند أيّ لحظةٍ تلامس النقطة السفلية من الدولاب الأرض وتكون ساكنة- انظر الشكل 8-51].

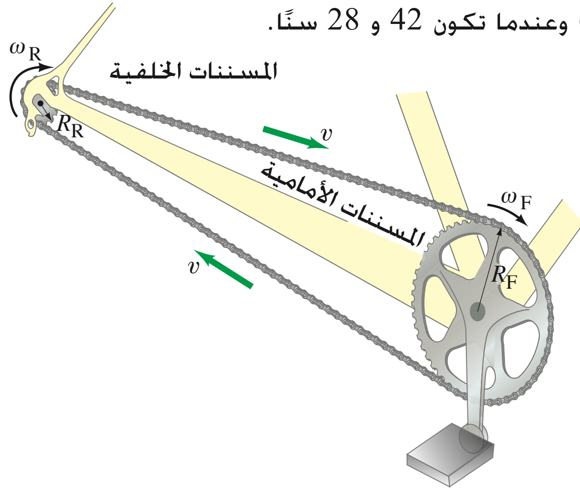


الشكل **8-51**
(المسألة 70)

.71 حجر شحذ 1.4-kg بشكل أسطوانة منتظمة نصف قطرها 0.20 m تدور بمعدّل 1800 rev/s من السكون خلال 6.0-s وبتسارع زاوي ثابت. احسب عزم الدوران الذي يولده المحرك.

.72 (أ) تُصنع لعبة الأطفال yo-yo من قرصين أسطوانيين مصمتين كتلة كلٍّ منهما 0.050 kg وقطره 0.075 m وتربطهما أسطوانةٌ كتلتها 0.0050 kg وقطرها 0.010 m. استعمل قانون حفظ الطاقة لحساب سرعة اللعبة الخطية عندما تصل إلى نهاية الخيط 1.0-m، إذا أُفلتت من السكون. (ب) ما نسبة الجزء الدورانيّ من طاقتها الحركية؟

.73 (أ) بالنسبة إلى الدرّاجة الهوائيّة، ما علاقة السرعة الزاوية للدولاب الخلفي (ω_R) مع السرعة الزاوية للبدّالات والمسنّنات الأماميّة (ω_F)، (الشكل 8-52)؟ أي اشتق صيغة لـ ω_R/ω_F. افرض أنّ N_F و N_R عدد أسنان المسنّنات الأماميّة والخلفيّة على الترتيب. وقد تباعدت الأسنان على مسافات متساويه على المسننات جميعها حتى تتمكّن السلسلة من التوافق معها بسلاسة. (ب) احسب النسبة ω_R/ω_F عندما يكون عدد المسنّنات الأماميّة والخلفيّة 52 و 13 على الترتيب (جـ) وعندما تكون 42 و 28 سنًّا.

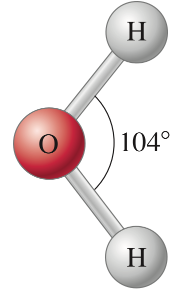


الشكل **8-52** (المسألة 73).

74. افرض أنّ نجمًا بحجم شمسنا، ولكن بكتلةٍ قدر شمسنا بـ 8.0 مرّات، يدور بسرعة 1.0 rev كل 12 يوميًا. إذا انهار هذا النجم تحت الجاذبيّة ليكون نجمًا نيوترونيًّا نصف قطره 11 km بحيث يفقد ثلاثة أرباع كتلته في هذه العمليّة، فماذا ستكون سرعته الدورانيّة؟ افرض أنّ النجم عبارةٌ عن كرةٍ منتظمةٍ دائمًا، وأنّ الكتلة الضائعة لم تحمل معها أيّ زخمٍ زاوي.

75. أحد احتمالات سيّارةٍ قليلة التلوث هو استعمال الطاقة المخزّنة بالحذّافة (دولاب الموازنة) الدوّارة. افرض أنّ مثل هذه السيارة كتلتها الكلية 1400 kg تستخدم حذّافة أسطوانة منتظمة قطرها 1.50 m وكتلتها 240 kg ويمكنها أن تسير 350 km دون الحاجة إلى إعادة تدوير الحذافة. (أ) اعمل فرضيّاتٍ معقولةً (قوّة احتكاك 450 N، عشرون مدّة تسارع من السكون إلى سرعة 95 km/h متساويةٌ في الصعود والهبوط، وأنّ الطّاقة يُعاد تخزينها في الحذّافة في أثناء الهبوط) وبيّن أنّ الطّاقة الكليّة اللازم تخزينها في الحذّافة هي 1.7×10^{8} J (ب) ما السرعة الزاوية للحذّافة عندما تكون مشحونةً تمامًا بالطّاقة؟ (ج) كم يستغرق محرّكٌ قدرته 150-hp لتزويد الحذافة بشحنة طاقةٍ كاملةٍ قبل بداية الرحلة؟

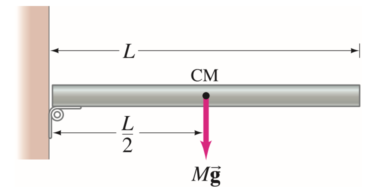
76. يبين (الشكل 8-53)جزيء ماء H_2O طول رابطة O-H هو 0.96 nm، H-O-H يعمل زاوية 104°. احسب عزم القصور الذاتي لجزيء H_2O حول محورٍ يمرّ بمركز ذرة الأكسجين (أ) عموديًّا على مستوى الجزيء. (ب) في مستوى الجزيء لينصف الروابط H-O-H.



الشكل **8-53**
(المسألة 76)

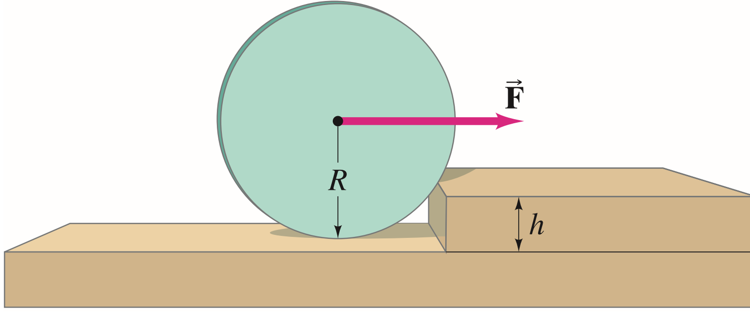
77. أسطوانةٌ جوفاء (طوق) تتدحرج على سطحٍ أفقيٍّ بسرعة $v = 3.3$ m/s عند وصولها إلى منحدرٍ يميل بزاوية 15°. (أ) ما المسافة التي ستسيّرها أعلى المنحدر؟ (ب) كم ستبقى على المنحدر قبل أن تعود إلى القاعدة؟

78. قضيبٌ منتظمٌ كتلته M، وطوله L، يمكن أن يدور بحريّة (اهمل الاحتكاك) حول مفصلٍ مثبتٍ بجدار، (الشكل 8-54). يمسك القضيب أفقيًّا ثمّ يفلتّ. عند لحظة الإفلات، احسب: (أ) التسارع الزاوي للقضيب. (ب) التسارع الخطّيّ لقمّة القضيب. افرض أنّ قوّة الجاذبيّة تؤثّر عند مركز كتلة القضيب، كما هو مبين [تنويه: انظر الشكل8-21 ي].



الشكل **8-54**
المسألة 78

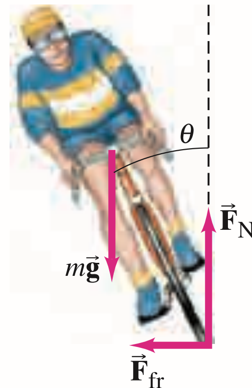
79. دولابٌ كتلته M ونصف قطره R. يقف الدولاب على الأرض ونريد أن تؤثّر بقوة F على محوره بحيث يتسلّق درجةً يستند إليها (الشكل 8-55). ارتفاع العتبة h، حيث $h < R$. ما القوّة الدنيا F اللازمة لذلك؟



الشكل **8-55** (المسألة 79)

80. سائق درّاجة هوائيّة يسير بسرعة $v = 4.2$ m/s على طريقٍ مستوية، يدور منعطفًا نصف قطره $r = 6.4$ m. القوى التي تؤثّر في سائق الدرّاجة والدراجة هي القوّة العموديّة $(\vec{F}_{fr})$ وقوّة الاحتكاك $m\vec{g}$ المتولّدة من الطريق $(\vec{F}_N)$ على العجلات. وقوّة الوزن، الوزن الكلّي للدرّاجة والسائق (انظر الشكل 8-56).(أ) فسّر بدقةٍ لماذا يجب أن تُعطى الزاوية θ التي تعملها الدراجة مع العمودي بـ $\theta = F_{fr}/F_N$ إذا حافظ السائق على التوازن. (ب) احسب θ للقيم المعطاة. (جـ) إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين العجلات والطريق يساوي $\mu_s = 0.70$ فما أقل نصف قطر للالتفاف؟



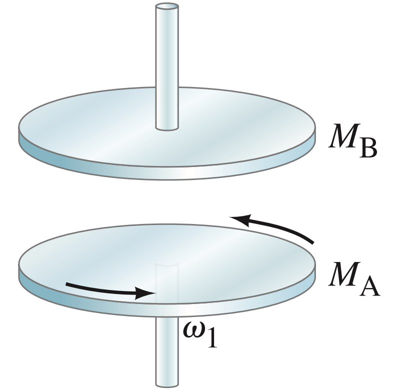


الشكل **8-56** (المسألة 80)

81. افرض أنّ داود وضع حجرًا كتلته 0.50-kg في المقلاع الذي طوله 1.5 m وبدأ بإدارتها في دائرة أفقيّة تقريبًا فوق رأسه، تسارعها من السكون إلى معدل 120 rpm خلال 5.0 s. ما العزم الدورانيّ اللازم لتحقيق هذه الخطوة؟ ومن أين يأتي هذا العزم؟

82. ضع نموذجًا ما لمتزلّجة على الجليد، مفترضًا أنّ جسمها أسطوانةٌ مصمتةٌ وذراعيها كقضيبان بتقدير الأبعاد المعقولة. احسب نسبة سرعتها الزاوية بذراعين ممدودتين و بذراعين مضمومتين إلى الجذع.

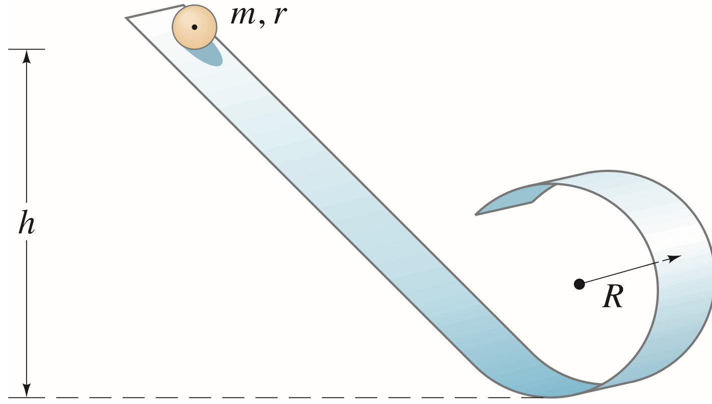
83. نصمّم القابض (جهاز تعشيق التروس)، الذي يتكوّن من صفيحتين أسطوانيتين كتلتاهما $M_A = 6.0\,kg$ و $M_B = 9.0\,kg$ وبأنصاف أقطارٍ متساوية $R = 0.60\,m$ تكون الصفيحتان ابتدءًا مفصولتين (الشكل 8-57) تتسارع الصفيحة M_A من السكون إلى سرعةٍ زاوية $\omega_1 = 7.2\,rad/s$ في زمن $\Delta t = 2.0\,s$. احسب: (أ) الزخم الزاوي لـــ M_A. (ب) العزم اللازم لتسارع M_A من السكون إلى ω_1. (ج) الصفيحة M_B في البداية ساكنةٌ وقابلةٌ للدوران من غير احتكاك، سُمح لها لتسقط عموديًّا (أو دُفعت بواسطة زنبرك) لتصبح ملتصقةً تمامًا بالكتلة M_A (سطحا تلامسهما عاليا الاحتكاك). قبل التماس، كانت M_A تدور بسرعةٍ ثابتة ω_1. وبعد التماس، بأيّ سرعة ω_2 تدور الصفيحتان معا؟



الشكل 8-57
(المسألة 83)

84. كرةٌ كتلتها m ونصف قطرها r، تتدحرج على السكّة الخشنة المبيّنة في (الشكل 8-58) . ما أقل ارتفاع h يجب أن تسقط منه الكرة إذا كان عليها الوصول إلى أعلى نقطةٍ في اللفة دون أن تغادر السكّة؟ افرض $r \ll R$، واهمل الضياع بسبب الاحتكاك.

85. أعد (المسألة 84) ، ولكن لا تفرض أن $r \ll R$.



الشكل 8-58 (المسائل 84 و 85 و 86).

86. لكي تكمل عجلات سيّارة 85 دورة عندما تخفض السيارة بانتظام سرعتها من 90.0 km/h إلى 60.0 km/h . قطر العجلات 00.90 m. (أ) ماذا كان التسارع الزاوي لكلّ عجلة؟ (ب) لو استمرّت السيّارة بالتباطؤ بالمعدّل نفسه، فكم تحتاج إلى وقت إضافي كي تتوقف؟

إجابات التمارين

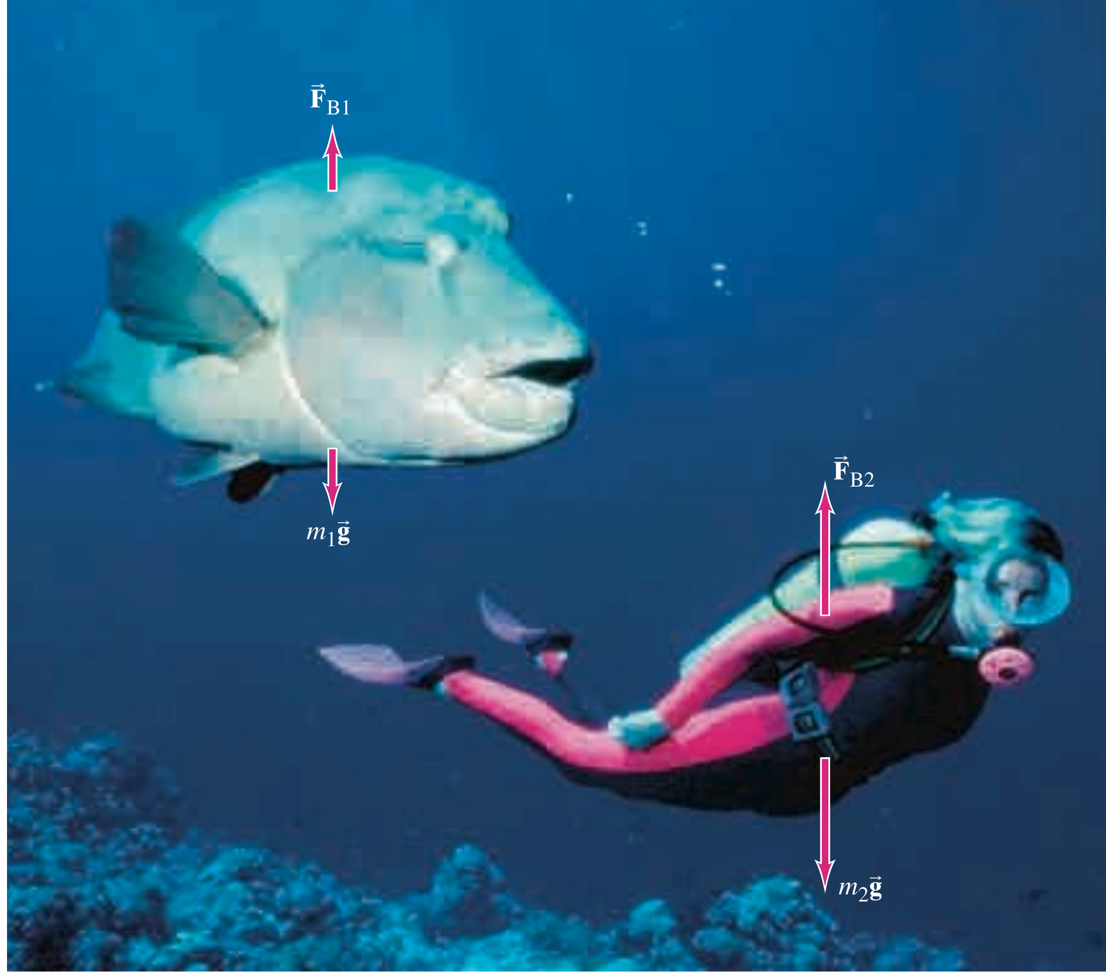
أ: $f = 0.076\,Hz; T = 13\,s$

ب: $\vec{F}_A$

جـ: نعم، تعمل شغلا لدفع ذراعيها.

د: الشغل يبذل في سحب الخيط وتقليل نصف قطر الدائرة.

يتأثّر الغوّاصون المزوّدون بجهاز تنفس تحت الماء، وكذلك الأحياء البحرية بقوّة الطفو $(\vec{F}_B)$ التي تعادل وزنها $m\vec{g}$. وتساوي هذه القوّة وزن حجم المائع المزاح *(مبدأ أرخميدس)*. وتنشأ بسبب ازدياد الضغط مع العمق في المائع. إنّ الأحياء البحرية ذات كثافةٍ تساوي كثافة الماء تقريبًا. لذا، فإنّ وزنها يساوي قوّة الطفو نوعًا ما. إنّ كثافة الإنسان أقلّ من كثافة الماء، ولهذا فإنّه يستطيع الطفو. وعندما تتدفق الموائع، تحدث ظواهر مهمّة؛ لأنّ الضغط في المائع أقلّ حيثما تكون السرعة أكبر *(مبدأ برنولي)*.



الفصل 10

الموائع

تحدثنا في فصول سابقةٍ عن أجسامٍ صُلبة تحافظ على شكلها، ويحدث فيها تغيّرٌ طفيفٌ مرن. وقد عاملنا الأجسام أحيانًا كجسيمات نقطيّة. والآن، سننقل اهتمامنا إلى مواد يتغيّر شكلها كثيرًا، وهي قابلة للجريان: إنّها "الموائع"، التي تتضمّن السوائل والغازات. وسندرس الموائع في حالة السكون (إستاتيكا الموائع) وفي حالة الحركة (ديناميكا الموائع).

1-10 حالات المادة

حالات المادة

للمادة إلى ثلاثة **أطوارٍ** أو **حالاتٍ** شائعة، هي: الصُلبة والسائلة والغازية. ويمكننا تمييز هذه الأطوار الثلاثة كما يلي: **الصُّلب** يحافظ على شكلٍ وحجمٍ ثابتين، حتى لو أثّرت فيه قوّةٌ كبيرة، فإنّها لا تغيّر شكله وحجمه بسهولة. أما **السائل** فلا يحتفظ بشكلٍ ثابت؛ بل إنّه يأخذ شكل الوعاء الذي يوضع فيه ، ولكن، وكما الجسم الصلب، فإنّ السائل لا ينضغط بسهولة، ولا يتغيّر حجمه إلّا تحت تأثير قوّةٍ كبيرة؛ فقط بتأثير قوّةٍ كبيرةٍ. في حين أنّ الغاز ليس له حجمٌ ثابتٌ ولا شكل ثابت أيضًا؛ بل يتمدّد ليملأ الوعاء الذي يحويه. فمثلًا، عند ضخّ الهواء في إطار السيارة، فإنّ الهواء لا ينساب جميعه ليملأ قاع الإطار كما يحدث في حالة السائل، إنّه ينتشر بحيث يملأ حجم الإطار كلّه. ولأنّ السوائل والغازات لا تملك شكلًا ثابتًا، فإنّها تملك القدرة على الجريان (الانسياب)، ولهذا تُدعى معًا **بالموائع**.

إنّ تقسيم المادة إلى ثلاثة أقسام ليس سهلًا دائمًا، ومثال ذلك كيفيّة تصنيف الزبدة. كما أنّ هناك طورًا رابعًا يمكن تمييزه، ألا وهو طور **البلازما**، الذي يحدث عند درجات حرارة عالية، وتتكون من ذرات متأينة (إلكترونات منفصلة عن أنويتها). ويعتقد بعض العلماء أنّ ما يُسمّى بالغرويات (جسيمات دقيقة معلّقة في السائل) يمكن اعتبارها حالةً منفصلةً للمادة. وتُعدّ **البلورات السائلة** التي تُستخدم في شاشات الحاسوب المحمولة، والآلات الحاسبة، والساعات الرقمية، حالةً من المادة بين الصُّلب والسائل. وعلى أيّ حال، فإنّنا لأهدافنا الحالية، سنهتمّ بصورةٍ رئيسةٍ بالحالات الثلاث الشائعة للمادة.

2-10 الكثافة والجاذبية النوعية

يُقال أحيانًا إنّ الحديد " أثقل" من الخشب. وهذا ليس صحيحًا؛ لأنّ جذعًا كبيرًا من الخشب أثقل من مسمارٍ من الحديد. لذا، علينا القول بأنّ الحديد أكثر كثافةً من الخشب.

تعريف الكثافة

الكثافة، ρ ، لمادة ما (ρ هي الحرف الصغير اليوناني rho) تُعرّف بأنّها كتلة وحدة الحجم من تلك المادة.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \textbf{(1-10)}$$

حيث m هي الكتلة لعيّنةٍ من المادة، و V حجمها. والكثافة هي خاصيّةٌ مميزةٌ لأيّ مادةٍ نقية. الأجسام المصنوعة من مادةٍ معيّنةٍ نقيّة، مثل الذهب الخالص، يمكنها أن تأخذ أيّ حجم وأيّ شكل، ولكن ستبقى الكثافة نفسها دائمًا. (نستعمل أحيانًا مفهوم الكثافة ، المعادلة (1-10)، لكتابة كتلة الجسم بصورة $m = \rho V$، ووزن الجسم، mg، بصورة $\rho V g$).

الوحدة الدولية SI للكثافة هي kg/m^3. وأحيانا تعطى الكثافة بـg/cm^3. لاحظ أن $1\,kg/m^3 = 1000\,g/(100\,cm)^3 = 10^3\,g/10^6\,cm^3 = 10^{-3}\,g/cm^3$ ولإعطاء الكثافة على صورة g/cm^3 لذلك يجب ضرب الكثافة g/cm^3 في 1000 للحصول على قيمة الكثافة kg/m^3. فمثلًا كثافة الألمنيوم $\rho = 2.70\,g/cm^3$، وهي تساوي $2700\,kg/m^3$. يبين (الجدول 1-10)كثافة مجموعة من المواد. كما أنّ القائمة تحدد درجة الحرارة والضغط لأنّهما عاملان يؤثران في كثافة المواد (رغم أنّ أثرها طفيف في السوائل والمواد الصُّلبة).

الجدول 10 - 1 كثافة بعض المواد *

المادة	الكثافة ρ (kg/m^3)
المواد الصلبة	
ألمنيوم	2.70×10^3
حديد وفولاذ	7.8×10^3
نحاس	8.9×10^3
رصاص	11.3×10^3
ذهب	19.3×10^3
أسمنت	2.3×10^3
رخام	2.7×10^3
خشب	$0.3\text{-}0.9\times10^3$
زجاج (عادي)	$2.4\text{-}2.8\times10^3$
جليد (H_2O)	0.917×10^3
عظام	$1.7\text{-}2.0\times10^3$
السوائل	
ماء $(4^\circ C)$	1.00×10^3
دم (بلازما)	1.03×10^3
دم (عام)	1.05×10^3
ماء البحر	1.025×10^3
زئبق	13.6×10^3
كحول/إثيايل	0.79×10^3
غازولين	0.68×10^3
الغازات	
هواء	1.29
هيليوم	0.179
ثاني أكسيد الكربون	1.98
ماء (بخار) $(100^\circ C)$	0.598

* الكثافات تعطى عند $0^\circ C$ و 1 atm ما لم يذكر غير ذلك.

المثال 1-10 الحجم، والكثافة معلومان

ما كتلة كرةٍ حديديّةٍ صُلبة نصف قطرها 18 cm؟

النّهج: نستعمل أولًا الصيغة المشهورة $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ (انظر داخل الغلاف الخلفي) لحساب حجم الكرة. ثم (المعادلة 1-10 والجدول 1-10)لتعطينا الكتلة m.

الحل: حجم الكرة هو:

$$V = \tfrac{4}{3}\pi r^3 = \tfrac{4}{3}(3.14)(0.18\,m)^3 = 0.024\,m^3.$$

من (الجدول 1-10) ، كثافة الحديد $\rho = 7800\,kg/m^3$. لذلك، (المعادلة 1-10) تعطي

$$m = \rho V = (7800\,kg/m^3)(0.024\,m^3) = 190\,kg.$$

تُعرّف **الجاذبيّة النوعيّة** لمادةٍ ما كنسبة كثافة المادة إلى كثافة الماء عند $4.0^\circ C$. ولأنّ الجاذبيّة النوعيّة نسبةٌ لذلك، فهي مجرّد عددٍ من غير أبعاد أو وحدات. كثافة الماء هي $1.00\,g/cm^3 = 1.00\times10^3\,kg/m^3$. لذلك، فإنّ الجاذبيّة النوعيّة (SG) لأيّ مادة تساوي عدديًّا كثافته بـ g/cm^3 أو 10^{-3} مضروبةً في كثافته بـkg/m^3 . مثلًا (انظر الجدول 1-10) الجاذبيّة النوعيّة للرصاص هي 11.3، وللكحول 0.79.

مبدأ الكثافة أو الجاذبيّة النوعيّة تفيدنا خاصّةٍ عند دراسة الموائع؛ لأنّنا نتعامل دائمًا مع حجمٍ ثابتٍ أو كتلةٍ ثابتة.

3-10 الضغط في الموائع

يعرف **الضغط** بأنّه القوّة لكلّ وحدة مساحة؛ حيث يُفهم من القوّة F أنّها مقدار القوّة المؤثّرة عموديًّا في مساحة السطح A

تعريف الضغط.

$$\text{الضغط} = P = \frac{F}{A} \qquad (2\text{-}10)$$

تنويه: الضغط كمية قياسية وليست متجهة.

وعلى الرغم من أنّ القوّة كميّةٌ متجهة، فإنّ الضغط كميّةٌ قياسية، فالضغط له مقدارٌ فقط. الوحدة الدوليّة للضغط هي N/m^2، ويُطلق على هذه الوحدة اسم **باسكال** (Pa) تكريمًا للعالِم بليز باسكال (انظر البند 10-5)؛ حيث $1 pa = 1 N/m^2$. وعلى أيّ حال، فسنستعمل N/m^2.
وهناك وحداتٌ أخرى تُستعمل عادةً، مثل $dyne/cm^2$, $1b/in^2$(تختصر psi). وهناك وحداتٌ أخرى متعدّدةٌ للضغط، مع تحويلاتها، ستناقش في (البند 10-6) (انظر كذلك القائمة داخل الغلاف الأمامي للكتاب).

المثال 10-2 حساب الضغط

قدما فتاةٍ كتلتها 60-kg تغطّيان مساحةً قدرها $500\ cm^2$. (أ) احسب الضغط الذي تبذله القدمان على الأرض.(ب) إذا وقفت هذه الفتاة على قدمٍ واحدة، فماذا سيكون الضغط تحت هذه القدم؟

النّهج: افرض أنّ هذه الفتاة في حالة سكون. الأرض تدفع للأعلى على قدمها بقوّةٍ تساوي وزنها mg، وهي تؤثّر بقوّة mg في الأرض؛ حيث القدم هي وسيلة الاتصال. ولأنّ $1\ cm^2 = (10^{-2}\ m)^2$ فإنّ $500\ cm^2 = 0.050\ m^2$.

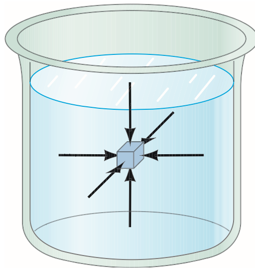
الحلّ: (أ) الضغط على الأرض الناجم عن القدمين هو

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{(60\ kg)(9.8\ m/s^2)}{(0.050\ m^2)} = 12 \times 10^3\ N/m^2.$$

(ب) إذا وقفت الفتاة على قدمٍ واحدة، فإنّ القوّة لا تزال تساوي وزنها، ولكن المساحة سوف تساوي نصف المساحة الأولى، ولذلك سيكون الضغط ضعف الضغط المحسوب في (أ): $24 \times 10^3\ N/m^2$.

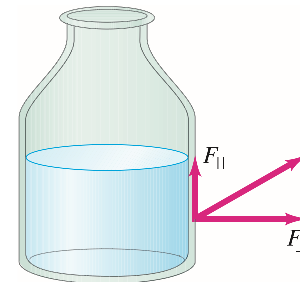
الموائع تنتج ضغطا في الاتجاهات جميعها.

إنّ الضغط مفيد، خاصّةً عند التعامل مع الموائع. وهناك مشاهداتٌ واقعيّةٌ في أنّ المائع ينتج ضغطًا في الاتجاهات جميعها؛ وهذا معروفٌ جيدًا للسبّاحين والغوّاصين الذين يشعرون بضغط الماء على جميع أجزاء أجسامهم عند عمقٍ معيّن. وهذا موضّحٌ في (الشكل 10-1). اعتبر مكعبًا صغيرًا من المائع بحيث يمكن إهمال تأثير الجاذبيّة فيه. الضغط على أحد جوانبه يساوي الضغط على الوجه المقابل. ولو كان هذا غير صحيح، فستكون هناك قوّةٌ محصّلةٌ على المكعب، وسوف يبدأ بالحركة. وإذا لم يكن المائع جاريًا، فإنّ الضغوط يجب أن تكون متساوية.

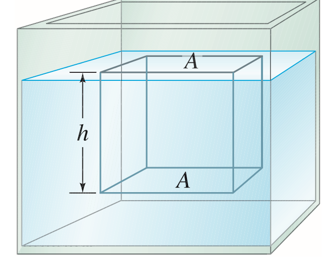


الشكل 10-1 الضغط متساو في كلّ اتجاه داخل المائع عند أيّ عمق، ولو لم يكن الأمر كذلك، فإنّ المائع سيكون متحركا.

وهنالك خاصيّةٌ أخرى مهمّةٌ للموائع الساكنة، وهي أنّ القوّة الناجمة من ضغط المائع على أيّ سطحٍ صُلبٍ في تماسٍّ معها، تكون عموديّةً عليه. لو كانت هناك مركبةً لهذه القوّة موازيةً للسطح، كما هو مبيّن في (الشكل 10 - 2) ، فإنّ السطح، حسب قانون نيوتن الثالث، يولّد قوّةً على المائع، ممّا يسبّب جريان المائع. وهذا يتضارب مع فرضنا بأنّ المائع ساكن. وعليه، فإنّ القوّة الناجمة من الضغط في المائع الساكن تكون دائمًا عموديّةً على السطح.



الشكل 10-2 لو كانت هناك مركبة قوّة موازية للسطح الصلب للوعاء، فإنّ السائل سوف يتحرك استجابة لذلك. للسائل الساكن $F_{||} = 0$.



الشكل 3-10 حساب الضغط عند عمق h داخل سائل.

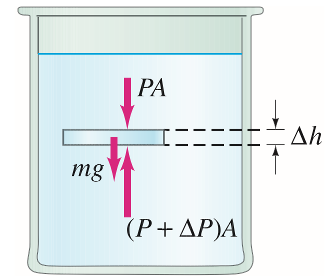
تغير الضغط مع العمق

دعنا الآن نحسب كميًّا كيفيّة تغيّر الضغط في المائع الساكن مع العمق. افترض نقطةً على عمق h تحت سطح السائل (أي أنّ السطح على ارتفاع h فوق هذه النقطة)، كما هو مبيّن في (الشكل 10-3). الضغط الناتج من السائل عند هذا العمق h يعود إلى وزن عمود السائل فوقه. لذا، فإنّ القوّة الناتجة من وزن السائل التي تؤثّر في المساحة A هي $F=mg=(\rho V)g=\rho Ahg$.
حيث Ah حجم عمود السائل، أمّا ρ فهي كثافة السائل (بفرض أنّها ثابتة)، في حين يشير g إلى تسارع الجاذبيّة. الضغط P بسبب وزن السائل يساوي

$$P=\frac{F}{A}=\frac{\rho Ahg}{A}$$

$$P=\rho gh. \qquad \text{[سائل]} \quad (3-10أ)$$

لاحظ أنّ المساحة A لا تؤثّر في الضغط عند عمقٍ معيّن. ويتناسب ضغط المائع طرديًّا مع كثافة السائل والعمق داخله. وعلى نحوٍ عام، فإنّ الضغط عند أعماقٍ متساويةٍ داخل السائل المنتظم يكون متساويًا.
(المعادلة 10-3أ) مفيدة للغاية. إنّها تنطبق على الموائع التي كثافتها ثابتةٌ ولا تتغيّر مع العمق- أي أنّ المائع غير قابلٍ للانضغاط. ويُعدّ هذا تقريبًا جيّدًا للسوائل. (رغم أنّه على أعماقٍ كبيرةٍ في المحيطات، تزداد كثافة الماء بوضوح بالانضغاط الناتج من الوزن الكبير للماء فوقه).



الشكل 4-10 القوى على شريحة رقيقة من المائع (مبينة مثل سائل، ولكن قد تكون غازًا)

أمّا الغازات، فهي قابلةٌ جدًّا للانضغاط، وتتغيّر كثافتها بصورةٍ مهمّةٍ مع العمق بهذه الحالة الشاملة، التي تتغيّر فيها ρ، فإنّ (المعادلة 10-3أ) قد لا تكون مفيدة. لذلك دعنا نجرّب شريحةً رقيقةً من السائل حجمها $V=A\,\Delta h$ كما هو مبيّن في (الشكل 10-4) . نختار Δh رقيقة لدرجة أنّ ρ لا تتغيّر بصورةٍ مهمّةٍ مع هذا السمك القليل Δh. افرض أنّ P هو الضغط المؤثّر للأسفل في السطح الأعلى، وافرض كذلك أنّ $P+\Delta P$ هو الضغط للأعلى على السطح الأسفل. القوّة المؤثّرة في شريحتنا الرقيقة هي $(P+\Delta P)A$ نحو الأعلى، وPA للأسفل، ووزن الشريحة للأسفل $mg=(\rho V)g=\rho A\,\Delta h\,g$. ونفرض أنّ السائل ساكن. وعليه، فإنّ القوّة المحصّلة على الشريحة تساوي صفرًا.
وبالتالي:

$$(P+\Delta P)A-PA-\rho A\,\Delta h\,g=0.$$

تختصر المساحة من كلّ حدّ، وعندما نحلّ لإيجاد ΔP نحصل على

التغير في الضغط مع تغير العمق في مائع.

$$\Delta P=\rho g\,\Delta h \qquad [\rho \approx \text{ثابت مع تغيّر العمق}\ \Delta h] \qquad (3-10ب)$$

تخبرنا (المعادلة 10-3ب) كيف يتغيّر الضغط مع تغيّرٍ طفيفٍ في العمق داخل المائع (Δh) ، حتى لو كان قابلًا للانضغاط.

المثال 3-10 الضغط عند الصنبور

تطبيق الفيزياء
التزويد بالماء.

يرتفع سطح الماء في الخزان 30 m عن صنبور الماء في المطبخ (الشكل 10 - 5). احسب الفرق في ضغط الماء بين الصنبور وسطح الماء في الخزان.

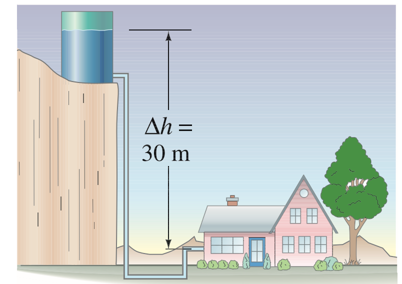
النّهج: عمليًّا، الماء غير قابلٍ للانضغاط، لذلك نفترض ρ ثابتةً حتى مع ارتفاع $\Delta h=30$ m. وما يهمّنا هو Δh فقط ، ويمكننا إهمال مسار أنبوب الماء وانحناءاته.

الحلّ: الضغط الجوّيّ نفسه يؤثّر عند سطح الماء في الخزّان والماء عند الصنبور. كذلك فإنّ فرق ضغط الماء بين الصنبور والسطح في الخزان هو

$$\Delta P=\rho g\,\Delta h=(1.0\times10^{3}\,\text{kg/m}^{3})(9.8\,\text{m/s}^{2})(30\,\text{m})$$
$$=2.9\times10^{5}\,\text{N/m}^{2}.$$

ملحوظة: أحيانًا، يُسمّى الارتفاع h **رأس الضغط**. في هذا المثال، رأس الماء هو 30 m عند الصنبور. والاختلاف في قطر الخزان والصنبور لا يؤثّر في النتيجة: الضغط هو الذي يؤثّر فقط.

الشكل 5-10 (المثال 10-3)



التمرين أ: سدّ يحفظ ماء بحيرةٍ عمقها عند السّدّ 85 m. إذا كان طول البحيرة 20 km، فكم يجب أن يكون سمك السّدّ لو كان طولها أصغر، فقط 1.0 km؟

4-10 الضغط الجوي و الضغط المقيس

الضغط الجوي

يتغير ضغط الجوّ الأرضي، كما في أيّ مائعٍ مع العمق. ولكن جوّ الأرض معقّدٌ بعض الشيء؛ إذ لا تتغير كثافة الهواء مع الارتفاع فقط، بل لا يوجد سطحٌ علويٌّ محدّدٌ يمكن قياس h (معادلة 10-3أ) على أساسه. لكننا نستطيع حساب الفرق في الضغط بين ارتفاعين باستعمال المعادلة (10-3ب).

إنّ ضغط الهواء في مكانٍ ما يتغيّر قليلًا تبعًا للظروف الجوّيّة؛ فعند سطح البحر، الضغط الجوّيّ المتوسّط يساوي $1.013 \times 10^5\ N/m^2$ (أو $14.7\ lb/in.^2$). هذه القيمة تعطينا وحدةً تُستعمل عادةً للضغط، **الضغط الجوي** (باختصار atm):

ضغط جوي واحد (وحدة الضغط)

$$1\ atm = 1.013 \times 10^5\ N/m^2 = 101.3\ kPa.$$

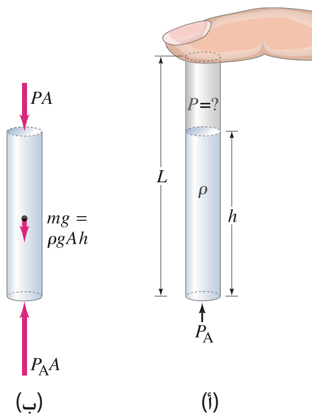
وهناك وحدةٌ أخرى للضغط تُستعمل أحيانًا (في التنبُّؤات الجوّيّة وخرائط الطقس) وهي **البار bar** ، الذي يُعرّف كما يلي:

البار (وحدة ضغط)

$$1\ bar = 1.00 \times 10^5\ N/m^2.$$

تطبيق الفيزياء
الضغط على الخلايا الحية.

وهكذا، فإنّ الضغط الجوّيّ المعياريّ أكبر بقليلٍ من 1 bar. يؤثّر الضغط الناتج من وزن الغلاف الجوّيّ في الأجسام المغمورة كلّها في هذا البحر الهائل من الهواء، بما في ذلك أجسامنا. كيف يستطيع جسم الإنسان تحمّل الضغط الكبير على سطحه؟ الحلّ هو أنّ الخلايا الحيّة تنتج ضغطًا داخليًّا يساوي الضغط الخارجيَّ تقريبًا، كما هو الحال في أنّ الضغط داخل بالون يتلاءم مع الضغط الجوّيّ الخارجي. كما أنّ إطار السيّارة ينتج ضغطًا داخليًّا أكبر بكثيرٍ من الضغط الخارجيّ بسبب متانته.



الشكل **6-10** (المثال 4-10)

المثال المفاهيمي 4-10 الإصبع يبقي الماء داخل القشّة

أدخل قشّةً طولها L في قنينةٍ طويلةٍ من الماء. ضع إصبعك على أعلى القشّة لتحجز بعض الهواء فوق الماء، ولتمنع دخول هواءٍ إضافيٍّ أو خروجه ، ومن ثمّ ارفع القشّة من الماء. ستلاحظ أنّ القشّة تحتفظ بمعظم الماء. (انظر الشكل 10-6 أ). هل للهواء المحصور بين إصبعك وسطح الماء في الأنبوب ضغط P أكبر، أم أقلّ، أم أنّه يساوي الضغط الجوّيّ P_A خارج القشّة؟

الإجابة: افترض القوى على عمود الماء (الشكل 10-6 ب). إنّ الضغط الجوّيّ خارج الأنبوبة يدفع السطح الأسفل للماء إلى الأعلى، في حين تسحب الجاذبيّة الماء إلى الأسفل، أمّا ضغط الهواء داخل الجزء الأعلى للقشّة فيدفع الماء إلى الأسفل. وبما أنّ الماء في حالة اتزان، فإنّ القوّة إلى الأعلى بسبب الضغط الجوّيّ تعادل القوّتين للأسفل. إنّ الطريقة الوحيدة لذلك هو أنّ ضغط الهواء في الداخل يكون أقلّ من الضغط الجوّيّ خارج القشّة. (عندما تزيل القشّة في البداية، قد ينساب جزءٌ قليلٌ من الماء خارجها، وبذلك يزيد حجم الغاز المحصور داخلها. وهكذا سيقلّ ضغط كثافته).

الضغط المقيس

الضغط المقيس

الضغط الكلي = الضغط الجوي + الضغط المقيس

من المهمّ ملاحظة أنّ أقيسة الضغط في الإطارات، ومعظم مقاييس الضغط الأخرى، تسجّل الضغط الذي يزيد على الضغط الجوي. ويُسمّى هذا **الضغط المقيس**. وللحصول على **الضغط المطلق (الكلي)**، P: علينا إضافة الضغط الجوي ، P_A، إلى الضغط المقيس، P_G:

$$P = P_A + P_G.$$

إذا سجّل مقياس ضغط الإطارات 220 kpa، فإنّ الضغط المطلق داخل الإطار هو $220\ kPa + 101\ kPa = 321\ kPa$، وهذا يكافيء 3.2 atm تقريبًا (2.2 atm الضغط المقيس).

10-5 مبدأ باسكال

يبذل غلاف الجوّ الأرضيّ ضغطًا على الأشياء جميعها التي على اتصال به، بما في ذلك الموائع الأخرى. وينتقل الضغط الخارجيّ المؤثّر في المائع عبر ذلك المائع. فمثلًا، حسب (المعادلة 10-3أ)، الضغط الناتج من الماء على عمق 100 m تحت سطح البحيرة هو $P = \rho g\,\Delta h = (1000\,\text{kg/m}^3)(9.8\,\text{m/s}^2)(100\,\text{m}) = 9.8 \times 10^5\,\text{N/m}^2$ أو 9.7 atm. لكن الضغط الكلّيّ عند هذه النقطة يعود للضغط الناتج من عمود الماء بالإضافة إلى الهواء فوقه. وعليه، فإنّ الضغط الناتج (إذا كانت البحيرة قريبة من مستوى سطح البحر) يساوي $9.7\,\text{atm} + 1.0\,\text{atm} = 10.7\,\text{atm}$. ويُعدّ هذا مجرّد مثالٍ واحدٍ على مبدأٍ عامٍّ يعود الفضل فيه إلى الفيلسوف والعالِم الفرنسي بليز باسكال (1623 – 1662). *وينصّ مبدأ باسكال على أنّه إذا أثّر ضغط خارجيّ في مائعٍ محصورٍ فإنّ الضّغط عند أيّ نقطةٍ داخل المائع سوف يزداد بالمقدار نفسه من الضّغط.*

مبدأ باسكال

تطبيق الفيزياء
الرافعة الهيدروليكية

هناك عددٌ من الأدوات العمليّة تستفيد من مبدأ باسكال. أحد الأمثلة على ذلك الرافعة الهيدروليكيّة المبيّنة في (الشكل 10-7أ)، حيث تُستعمل قوّة صغيرةٌ للحصول على قوّةٍ ناتجةٍ كبيرة، وذلك بجعل مساحة مكبس الخرج أكبر من مساحة مكبس الدخل. ولرؤية كيفية عمل ذلك، نفرض أنّ مكبس الدخل والخرج في الارتفاع نفسه (تقريبًا). ثمّ تزيد قوّة الدخل F_{in}، وحسب مبدأ باسكال، الضغط بالتساوي خلال المائع. لذلك، عند المستوى نفسه (انظر الشكل 10-7أ).

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}}$$

ولكن $P = F/A$. لذلك، نكتب علاقة التساوي السابقة

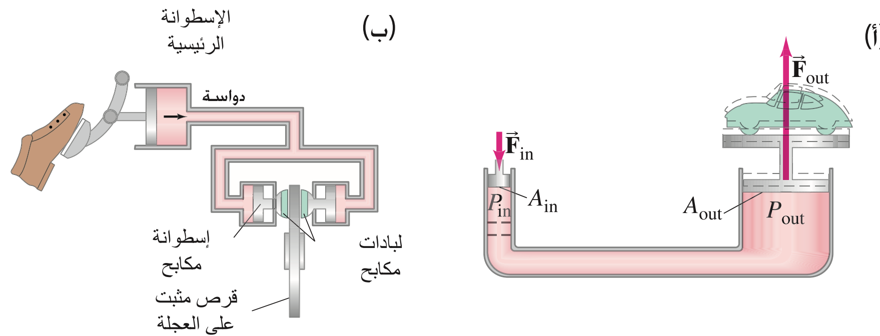
$$\frac{F_{\text{out}}}{A_{\text{out}}} = \frac{F_{\text{in}}}{A_{\text{in}}}$$

أو

$$\frac{F_{\text{out}}}{F_{\text{in}}} = \frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}$$

الفائدة الآلية

تُسمّى الكميّة $F_{\text{out}}/F_{\text{in}}$ الفائدة الآليّة للرافعة الهيدروليكيّة، وتساوي النسبة بين المساحتين. مثلًا، لو كانت مساحة مكبس الخرج أكبر 20 مرّةً من مساحة مكبس الدخل، فإنّ القوّة تضرب في معامل 20. أي أنّ قوّة 200 lb ترفع سيارة وزنها 4000-lb.



الشكل **10-7** تطبيق مبدأ باسكال: (أ) الرافعة الهيدرولكية. (ب) المكابح الهيدروليكية في السيارة.

تطبيق الفيزياء
مكابح السيارة

يوضّح (الشكل 10-7 ب) نظام المكابح في السيارة. عندما يضغط السائق دوّاسة المكابح، يزيد الضغط في الأسطوانة الرئيسة. هذه الزيادة في الضغط تنتقل عبر سائل المكابح، وهكذا تدفع لبّادات المكابح لتضغط على قرصٍ مثبتٍ على العجلات.

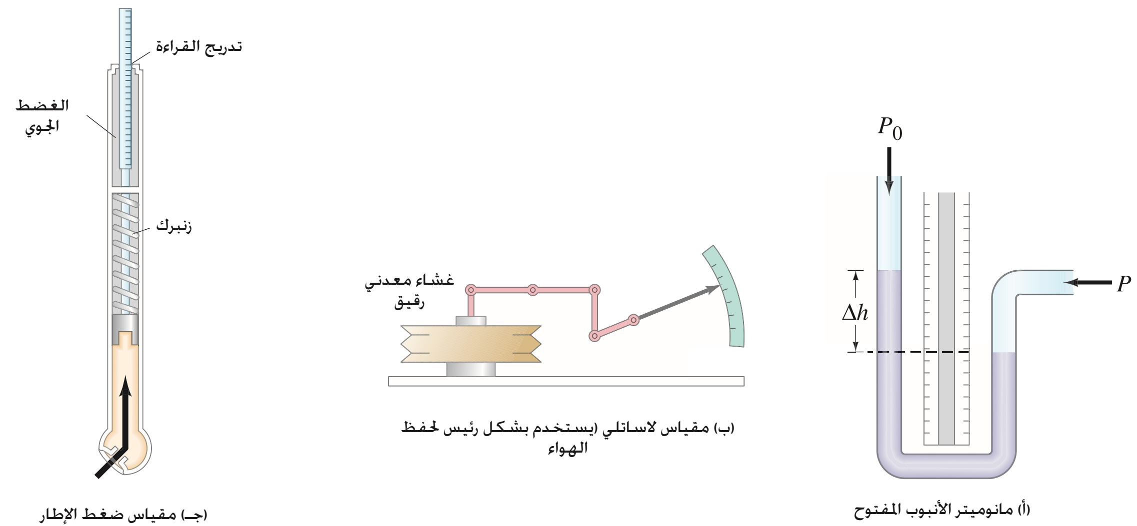
10-6 قياس الضغط، المقاييس والباروميتر

المانوميتر

تمّ اختراع الكثير من الأدوات لقياس الضغط، بعضها مبيّن في (الشكل 10-8). أبسط هذه الأدوات هو مانوميتر الأنبوب المفتوح (الشكل 10-8 أ)، وهو أنبوبٌ بشكل حرف U يُملأ جزئيًّا بسائل الزئبق أو الماء عادة. يرتبط الضغط المقيس P عادة (بالمعادلة 10-3 ب) بالفرق في الارتفاع Δh بين مستويي السائل

الضغط تحت سطح سائل معرض للضغط الجوي.

$$P = P_0 + \rho g\,\Delta h \qquad \textbf{(10-3جـ)}$$



الشكل 8-10 مقاييس الضغط: (أ) مانوميتر الأنبوب المفتوح. (ب) مقياس لاسائلي. (جـ) مقياس ضغط الإطارات المعتاد.

حيث P_0 هو الضغط الجوّيّ (يؤثّر في سطح السائل في الأنبوب الأيسر)، وρ هي كثافة السائل. لاحظ أنّ الكميّة $\rho g \, \Delta h$ هي الضغط المقيس – المقدار الذي يزيد به الضغط P على الضغط الجوّيّ P_0. لو كان السائل في الأنبوب الأيسر أخفض من الأنبوب الأيمن، فإنّ P تكون أقلّ من الضغط الجوّيّ (Δh ستكون سالبة).

أحيانًا، بدلًا من حساب حاصل الضرب $\rho g \, \Delta h$، فإنّه يكفي تحديد التغيّر في الارتفاع Δh. وفي الواقع، يُقاس الضغط أحيانًا بإعطاء كم ملمتر زئبق ($mm\text{-}H_2O$) أو "ملمتر من الماء" ($mm\text{-}H_2O$). الوحدة mm-Hg تعادل ضغطًا $133 \, N/m^2$، لأنّ $\rho g \, \Delta h$ التي تقابل 1mm = 1.0 * 10^-3 m من الزئبق تعطي

$$\rho g \, \Delta h = (13.6 \times 10^3 \, kg/m^3)(9.80 \, m/s^2)(1.00 \times 10^{-3} \, m) = 1.33 \times 10^2 \, N/m^2$$

الوحدة mm-Hg تُسمّى كذلك "*torr*" تكريمًا للعالِم تورشللي (1608 - 1647)، الذي كان تلميذًا لجاليليو الذي اخترع البارومتر (انظر لاحقًا). معاملات التحويل بين الوحدات المختلفة للضغط معروضةٌ في (الجدول 10-2). ومن المهمّ أنّ وحدة $Pa = N/m^2$ هي الوحدة الدوليّة *SI* المستخدمة في الحسابات.

الـ torr (وحدة ضغط)

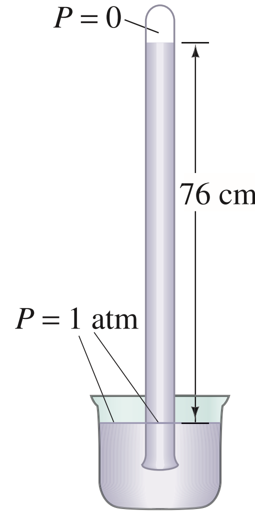
حل المسألة

إستخدام الوحدات العالمية SI في الحسابات $1 \, Pa = 1 \, N/m^2$

نوعٌ آخر من المقاييس هو اللاسائلي (الشكل 10-8ب): حيث يتصل المؤشّر مع طرف أنبوب معدنيٍّ رقيق مفرغ من الهواء. وفي المقياس الإلكتروني، يؤثّر الضغط في غشاءٍ معدنيٍّ رقيق؛ حيث تتمّ ترجمة تشوّهه إلى إشارةٍ كهربائيّةٍ عن طريق محوّلٍ للطّاقة. كيفيّة بناء مقياس ضغط الإطارات العادي مبينة في (الشكل 10-8جـ) .

الجدول 10-2 معاملات التحويل بين الوحدات المختلفة للضغط

بدلالة $Pa = 1 N/m^2$	1amt بالوحدات المختلفة
$1 \, atm = 1.013 \times 10^5 \, N/m^2$	$1 \, atm = 1.013 \times 10^5 \, N/m^2$
$= 1.013 \times 10^5 \, Pa = 101.3 \, kPa$	
$1 \, bar = 1.000 \times 10^5 \, N/m^2$	$1 \, atm = 1.013 \, bar$
$1 \, dyne/cm^2 = 0.1 \, N/m^2$	$1 \, atm = 1.013 \times 10^6 \, dyne/cm^2$
$1 \, lb/in.^2 = 6.90 \times 10^3 \, N/m^2$	$1 \, atm = 14.7 \, lb/in.^2$
$1 \, lb/ft^2 = 47.9 \, N/m^2$	$1 \, atm = 2.12 \times 10^3 \, lb/ft^2$
$1 \, cm\text{-}Hg = 1.33 \times 10^3 \, N/m^2$	$1 \, atm = 76 \, cm\text{-}Hg$
$1 \, mm\text{-}Hg = 133 \, N/m^2$	$1 \, atm = 760 \, mm\text{-}Hg$
$1 \, torr = 133 \, N/m^2$	$1 \, atm = 760 \, torr$
$1 \, mm\text{-}H_2O \, (4°C) = 9.81 \, N/m^2$	$1 \, atm = 1.03 \times 10^4 \, mm\text{-}H_2O \, (4°C)$



الشكل 10-9 بارومتر زئبقي- اخترعه تورشللي- مبين هنا؛ حيث الضغط يساوي ضغطا عياريا ، 76 cm-Hg.

يمكن قياس الضغط الجوّيّ بواسطة نوع معدّلٍ من المانوميتر الزئبقي الذي إحدى نهايتيه مغلقة، وهو ما يُسمّى **باروميترا** زئبقيًّا (الشكل 10-9). يُملأ أنبوب الزجاج كاملًا بالزئبق، ثمّ يُقلب في حوضٍ من الزئبق. إذا كان طول الأنبوب كافيًا، فإنّ مستوى الزئبق ينخفض تاركًا فراغًا عند قمّة الأنبوب؛ لأنّ الضغط الجوّيّ يمكن أن يحمل عمودًا من الزئبق ارتفاعه 76 cm فقط (بالضغط 76 cm عند الضغط الجوّيّ العياري). أي أنّ عمودًا من الزئبق ارتفاعه 76 cm ينتج ضغطًا مساويًا للضغط الجوّيّ*:

$$P = \rho g \, \Delta h$$
$$= (13.6 \times 10^3 \, kg/m^3)(9.80 \, m/s^2)(0.760 \, m) = 1.013 \times 10^5 \, N/m^2 = 1.00 \, atm.$$

تكون المانوميترات المستخدمة في البيوت عادةً لاسائليّة (الشكل 10-8 ب) أو إلكترونيّة.

ستبيّن الحسابات المماثلة للحسابات في الأعلى أنّ الضغط الجوّيّ يتحمّل عمودًا من الماء ارتفاعه 10.3 m في أنبوب قمّته مفرغة (الشكل 10-10). ومهما كانت جودة مضخّة مفرغة، فإنّها لا تستطيع رفع الماء أكثر من 10 m تقريبًا. لقد درس جاليليو هذه المسألة، إلّا أنّ تلميذه تورشللي كان أول من فسرها. والفكرة هي أنّ المضخّة لا تمتصّ الماء إلى أعلى الأنبوب، بل تخفض الضغط عند قمّته. وبذلك يدفع الضغط الجوّيّ الماء إلى أعلى الأنبوب إذا كانت النهاية العليا أقلّ ضغطًا (بسبب الفراغ)، مثلما يدفع ضغط الهواء الزئبق 76 cm في الباروميتر.



الشكل 10-10 بارومتر الماء: تدخل نهاية أنبوب مملوء بالماء في حوض ماء، مع المحافظة على السدادة في الأعلى مغلقة. عندما تفتح النهاية السفلى للأنبوب، ينساب بعض الماء من الأنبوب إلى الحوض. وبذلك يترك فراغًا بين السطح الأعلى

المثال المفاهيمي 10-5 المصّ

تجلس في مقابلة، يقترح فيها مهندسٌ مبتدئٌ من وكالة الفضاء الأمريكيّة *NASA* صناعة أحذية ماصّة لروّاد مكوك الفضاء الذين يعملون خارج المركبة الفضائيّة. بعد أن تنتهي من دراسة هذا الفصل، تستطيع أن تذكّره بالفكرة الخطأ لهذه الخطة: ما هي؟

الحل: تعمل فناجين المصّ على طرد الهواء تحت الفنجان. ما يمسك الفنجان في مكان هو ضغط الهواء خارجه. (تكون هذه قوّة ملموسة على الأرض. فمثلًا، فنجان قطره 10 cm مساحته $7.9 \times 10^{-3} \, m^2$، قوّة الضغط الجوّيّ عليه هي $(7.9 \times 10^{-3} \, m^2)(1.0 \times 10^5 \, N/m^2) \approx 800 \, N$، حوالي (180 lbs!). لكن في الفضاء الخارجي، ليس هناك ضغطُ هواءٍ يمسك الحذاء الماصّ على المركبة الفضائيّة.

أحيانًا، نفكّر بطريق الخطأ أنّ المصّ هو شيءٌ نقوم بعمله. فمثلًا، نعتقد أنّنا نسحب الصودا خلال القشة الماصّة. ولكن الصحيح هو أنّنا نقلّل الضغط عن قمّة القشّة، فيقوم الضغط الجوّيّ بدفع الصودا إلى أعلاها

* هذه الحسابات تدعم ما هو مبين في الجدول 10-2، 1 atm = 76 cm-*Hg*.

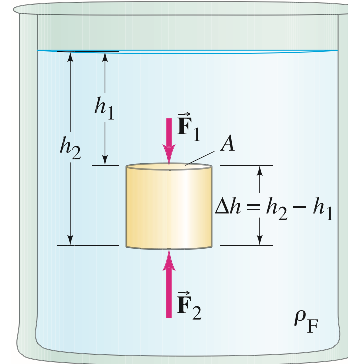
7-10 الطَّفو ومبدأ أرخميدس

يبدو وزن الصخور أقل تحت الماء.

طفو الأخشاب

تبدو الأجسام المغمورة في مائعٍ أخفّ وزنًا ممّا لو كانت خارجه. فمثلًا، ستجد صعوبةً في رفع حجر كبيرٍ عن الأرض، في حين يمكن رفعه بسهولةٍ من قعر الوادي. عندما يبدأ الحجر بالخروج من سطح الماء، يبدو فجأةً أثقل بكثيرٍ. كثيرٌ من الأجسام، مثل الخشب تطفو فوق سطح الماء. هذان مثالان على قوّة الطفو. في كلّ مثال، تؤثر قوّة الجاذبيّة نحو الأسفل. قوّة الطفو على الأسماك والغوّاصين (كما في صورة افتتاحية الفصل) تعادل قوّة الجاذبيّة نحو الأسفل تقريبًا ، وتسمح لهم أن "يسبحوا" باتزان.

تنتج قوّة الطفو بسبب زيادة الضغط مع زيادة العمق. وهكذا، فإنّ الضغط نحو الأعلى على قاعدة الجسم المغمور يكون أكبر من قوّة الضغط على سطحه الأعلى. ولرؤية هذا الأثر، افترض أسطوانةً ارتفاعها Δh حيث A مساحة كلٍّ من سطحيها العلويّ والسفليّ. وهي مغمورةٌ تمامًا في مائع كثافته ρ_F ، كما هو مبيّن في (الشكل 10-11). يبذل المائع ضغطًا $P_1 = \rho_F g h_1$ على السطح العلويّ للأسطوانة (المعادلة 10-3أ).



الشكل 10-11 تحديد قوّة الطفو.

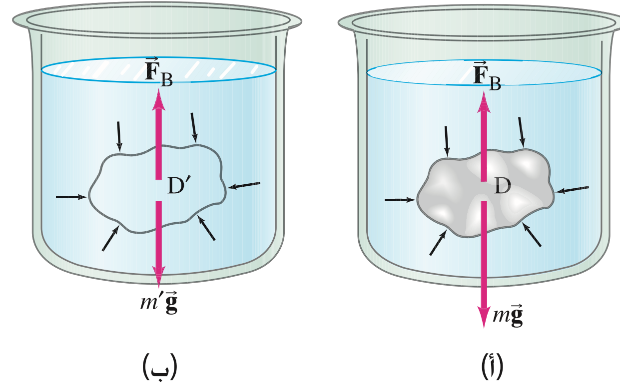
والقوّة الناتجة من هذا الضغط على السطح العلويّ للأسطوانة تساوي $F_1 = P_1 A = \rho_F g h_1 A$، وتؤثّر نحو الأسفل. وبصورةٍ مماثلة، فإنّ المائع يبذل قوّةً على قاعدة الأسطوانة تساوي $F_2 = P_2 A = \rho_F g h_2 A$.

القوّة المحصّلة على الأسطوانة الناتجة من ضغط المائع، وهي **قوّة الطفو**، $\vec{F}_B$، تؤثّر للأعلى ومقدارها

$$\begin{aligned} F_B = F_2 - F_1 &= \rho_F g A(h_2 - h_1) \\ &= \rho_F g A \Delta h \\ &= \rho_F V g \\ &= m_F g \end{aligned}$$

حيث $V = A \Delta h$ هو حجم الأسطوانة، أمّا حاصل الضرب $\rho_F V$ فهو كتلتها، في حين أنّ $\rho_F V g = m_F g$ هو وزن السائل الذي يأخذ حجمًا يساوي حجم الأسطوانة. وهكذا، فإنّ قوّة الطفو على الأسطوانة تساوي وزن المائع المزاح بوساطتها. وهذه النتيجة صحيحةٌ بغضّ النظر عن شكل الجسم. ويُعزى اكتشافها إلى أرخميدس (212-287 قبل الميلاد)، وتُدعى بقاعدة **(مبدأ) أرخميدس** التي تنصّ على أنّ: **قوّة الطفوّ على جسمٍ مغمورٍ في مائع تساوي وزن المائع المزاح بواسطة الجسم**. ونقصد بـ " المائع المزاح" حجمًا من المائع مساويًا لحجم الجسم المغمور، أو ذلك الجزء من الجسم المغمور إذا كان الجسم طافيًا أو مغمورًا جزئيًّا (المائع الذي اعتاد أن يكون مكان الجسم). إذا وُضع الجسم في إناءٍ زجاجيٍّ مملوءٍ حتى الحافّة بالماء، فإنّ الماء المنسكب يمثّل الماء الذي أُزيح بواسطة الجسم.

قاعدة (مبدأ) أرخميدس.



الشكل 10-12 مبدأ أرخميدس

يمكننا اشتقاق مبدأ أرخميس بصورةٍ عامّةٍ باتباع طريقةٍ بسيطةٍ ولكنّها رائعة. الجسم D ذو الشكل غير المنتظم، المبيّن في (الشكل 10-12أ) تؤثر فيه قوّة الجاذبيّة (وزنه، $m\vec{g}$ نحو الأسفل)، وقوّة الطفو $\vec{F}_B$ نحو الأعلى. ونريد أن نحدّد قوّة الطفو F_B. لعمل ذلك؛ نفترض جسمًا D' في (الشكل 10-12 ب)، والآن، هذا الجسم مكوّنٌ من المائع نفسه، d شكل الجسم الأصليّ وحجمه، ويقع على العمق نفسه. ويمكنك تخيّل أنّ هذا الجسم من المائع كأنّه مُحاطٌ بغشاءٍ غير مرئيّ من المائع. إنّ قوّة الطفو F_B على هذا الجسم من المائع هي نفسها تمامًا التي تؤثّر في الجسم الأصليّ؛ لأنّ المائع المحيط، الذي يؤثّر بقوّة F_B له التوزيع نفسه. هذا الجسم من المائع D' في حالة اتزان (لأنّ المائع على نحو عام في حالة سكون). لذا، فإنّ $F_B = m'g$ حيث $m'g$ وزن الجسم المائع، وبالتالي فإنّ قوّة الطفو F_B تساوي وزن جسم المائع الذي حجمه يساوي حجم الجسم الأصليّ المغمور؛ وهذا هو مبدأ أرخميدس.

إنّ اكتشاف أرخميدس تمّ بواسطة التجربة. وما بيّنّاه في الفقرات السابقة هو أنّ مبدأ أرخميدس يمكن اشتقاقه من قوانين نيوتن.

المثال المفاهيمي 10-6 وعاءان من الماء

افرض أنّ هناك وعاءين متماثلين من الماء مملوءين حتى الحافة. أحد الوعاءين يحتوي على ماءٍ فقط، أمّا الآخر فيحتوي على قطعةٍ من الخشب تطفو فيه. أيُّ الوعاءين أكثر وزنًا؟

الإجابة: كِلا الوعاءين لهما الوزن نفسه. تذكّر مبدأ أرخميدس: يزيح الخشب كميّةً من الماء مساويةً لوزنه. بعض الماء سوف ينسكب من فوق حافة الوعاء، ولكن مبدأ أرخميدس يشير إلى أنّ الماء المنسكب له وزنٌ مساوٍ لوزن الخشب؛ لذا، فإنّ للوعاءين وزنين متساويين.

المثال 10-7 الضغط عند الصنبور

يستقرّ تمثالٌ قديمٌ كتلته 70-kg على أرض قعر البحر. إذا كان حجم التمثال يساوي $3.0 \times 10^4\ \text{cm}^3$. فكم القوّة اللازمة لرفعه؟

النّهج: القوّة F اللازمة لرفع التمثال تساوي وزن التمثال mg مطروحًا منه قوّة الطفو F_B. (الشكل 10-13) هو مخطط الجسم الحرّ.

الحلّ: قوّة الطفو على التمثال بسبب الماء تساوي وزن $3.0 \times 10^4\ \text{cm}^3 = 3.0 \times 10^{-2}\ \text{m}^3$ من الماء. (ماء البحر $\rho = 1.025 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$).

$$F_B = m_{H_2O}\,g = \rho_{H_2O} V g$$

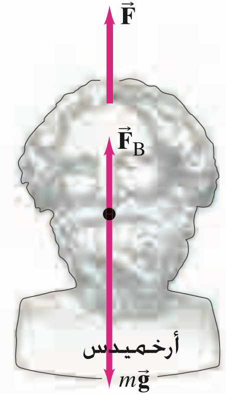
$$= (1.025 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(3.0 \times 10^{-2}\ \text{m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)$$

$$= 3.0 \times 10^2\ \text{N}.$$

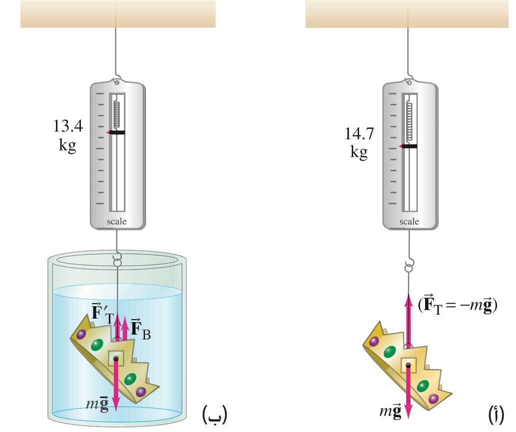
وزن التمثال هو $mg = (70\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 6.9 \times 10^2\ \text{N}$ لذا، فإنّ القوّة F التي تلزم لرفع التمثال هي $690\ \text{N} - 300\ \text{N} = 390\ \text{N}$. إنّها كما لو أنّ التمثال كتلته $(390\ \text{N})/(9.8\ \text{m/s}^2) = 40\ \text{kg}$ فقط

ملحوظة: هنا، $F = 390\ \text{N}$ هي القوّة اللازمة لرفع التمثال من غير تسارعٍ وهو تحت الماء. وعندما يخرج التمثال، فإنّ القوّة F تزداد لتصل إلى 690 N عندما يصبح التمثال خارج الماء تمامًا.

الشكل 10-13 (المثال 10-7). القوّة اللازمة لرفع التمثال $\vec{F}$.



يقال إنّ أرخميدس اكتشف مبدأه في حوض السباحة من خلال تفكيره في إثبات أنّ تاج الملك مصنوعٌ من الذهب الخالص أم فيه زيف. للذهب جاذبيّةٌ نوعيّةٌ مقدارها 19.3، أكبر بعض الشيء من معظم الفلزات، إلّا أنّ تحديد الجاذبيّة النوعيّة أو الكثافة ليس أمرًا مباشرًا؛ لأنّه حتى لو كانت الكتلة معلومة، فإنّ حجم جسمٍ غير منتظمٍ لا يمكن حسابه بسهولة. على أيّ حال، إذا كان وزن الجسم $(=w)$ في الهواء، وكذلك وزنه تحت الماء $(=w')$، فإنه يمكن استخدام قاعدة أرخميدس لحساب الكثافة، كما يبين المثال التالي. الكمية w' تُسمّى الوزن الظاهري، وهو ما يقرأه الميزان في أثناء غمر الجسم في الماء (انظر الشكل 10-14)؛ w' يساوي الوزن الحقيقي $(w = mg)$ مطروحًا منه قوّة الطفو.



الشكل **10-14** (أ) يقرأ الميزان كتلة الجسم في الهواء، وهو في هذه الحالة التاج في المثال (10-8). الأجسام كلّها في حالة سكون. لذا، فإنّ الشد F_T في الخيط يساوي وزن الجسم w $F_T = mg$ نبيّن مخطّط الجسم الحرّ للتاج، F_T هي ما تُسبّب قراءة الميزان (إنّها تساوي القوّة المحصّلة نحو الأسفل على الميزان، تبعًا لقانون نيوتن الثالث). (ب) عندما يكون الجسم مغمورًا، فهناك قوّة إضافيّةٌ عليه هي قوّة الطفو F_B. القوّة المحصّلة تكون صفرًا، لذلك، $F'_T + F_B = mg\,(=w)$. يقرأ الميزان الآن $m' = 13.4\text{ kg}$، حيث m' ترتبط بالوزن الفعلي $w' = m'g$. وهكذا، فإن $F'_T = w' = w - F_B$.

المثال 10-8 أرخميدس: هل التاج من الذهب الخالص؟

عندما يغمر تاجٌ كتلته 14.7 kg في الماء، فإنّ ميزانًا دقيقًا يقرأ 13.4 kg فقط. فهل التاج مصنوعٌ من الذهب الخالص؟

النّهج: إذا كان التاج من الذهب، فإنّ كثافته أو جاذبيّته النوعيّة يجب أن تكون عالية. SG = 19.3 (انظر البند 10-2 والجدول 10-1) تحدد الجاذبيّة النوعيّة باستخدام مبدأ أرخميدس ومخطط الجسم الحرّ المبيّن في (الشكل 10-14).

الحل: الوزن الظاهريّ للجسم المغمور (التاج) يساوي w'، ويساوي F'_T في (الشكل 10-14 ب). مجموع القوى على الجسم يساوي صفرًا، وبهذا w' يساوي $w\,(=mg)$ مطروحًا منه قوّة الطفو F_B:

$$w' = F'_T = w - F_B$$

ولذلك

$$w - w' = F_B$$

افرض أنّ V حجم الجسم المغمور كليًّا، و ρ_O كثافته (ولذلك $\rho_O V$ تساوي كتلته). وافترض كذلك أنّ ρ_F كثافة المائع (ماء). عندما $(\rho_F V)g$ يساوي وزن المائع المزاح $(=F_B)$. يمكننا الآن كتابة.

تذكر أنّ $m = \rho V$ (المعادلة 10-1).

$$w = mg = \rho_O V g$$
$$w - w' = F_B = \rho_F V g.$$

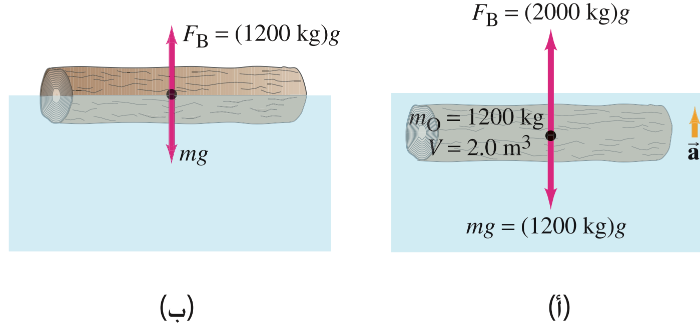
وبقسمة المعادلتين، نستنتج ما يلي:

$$\frac{w}{w - w'} = \frac{\rho_O V g}{\rho_F V g} = \frac{\rho_O}{\rho_F}.$$

ونرى أنّ $w/(w - w')$ يساوي الجاذبيّة النوعية للجسم، وإذا كان المائع ماء، فإنّ كثافة الماء $(\rho_F = 1.00 \times 10^3\text{ kg/m}^3)$ وهكذا

$$\frac{\rho_O}{\rho_{H_2O}} = \frac{w}{w - w'} = \frac{(14.7\text{ kg})g}{(14.7\text{ kg} - 13.4\text{ kg})g} = \frac{14.7\text{ kg}}{1.3\text{ kg}} = 11.3$$

وهذا يكافيء كثافة $11{,}300\text{ kg/m}^3$. وعليه، يبدو أنّ التاج مصنوعٌ من الرّصاص (انظر الجدول 10-1)!.



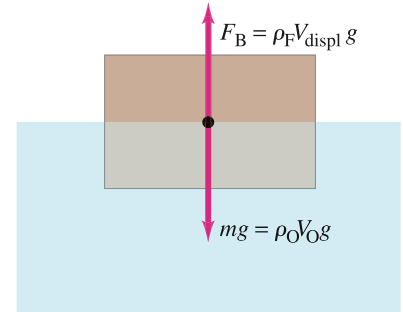
الشكل 10-15 (أ) يتسارع الجذع المغمور كليًا نحو الأعلى بسبب أنّ $F_B > mg$. يصل الجذع إلى الاتزان؛ (ب) عندما تصبح $\Sigma F = 0$، وبذلك تكون $F_B = mg = (1200\ kg)g$. أي أنّ $1200\ kg$ أو $1.2\ m^3$ من الماء أزيح.

ينطبق مبدأ أرخميدس كذلك على الأجسام الطافية، مثل الخشب. على نحوٍ عام، يطفو الجسم على المائع إذا كانت كثافته أقلّ من كثافة المائع. وهذا ما يبدو واضحًا في (الشكل 10-15أ)؛ حيث يتأثر الجسم المغمور بقوّة محصّلة للأعلى، ويطفو على السطح إذا كانت $F_B > mg$؛ أي أنّه، إذا كانت $\rho_F Vg > \rho_O Vg$ أو $\rho_F > \rho_O$. في حالة الاتزان – أي، قوّة الطفو في حالة الطفو على جسم ما تساوي وزن الجسم. فمثلًا، إذا كانت الجاذبيّة النوعيّة للجذع تساوي 0.60 وحجمه يساوي $2.0\ m^3$ وكتلته

المغمور

$$m = \rho_O V = (0.60 \times 10^3\ kg/m^3)(2.0\ m^3) = 1200\ kg.$$

إذا انغمر الجذع بصورة كاملة، فإنّه سيزيح كميّةً من الماء كتلتها $m_F = \rho_F V = (1000\ kg/m^3)(2.0\ m^3) = 2000\ kg$. وهكذا تكون قوّة الدفع (الطفو) على الجذع أكبر من وزنه، لذا، يطفو إلى أعلى السطح (الشكل 10-15). وسوف يصل الجذع إلى الاتزان عندما يزيح $1200\ kg$ من الماء؛ أي أنّ $1.2\ m^3$ من حجمه سوف ينغمر. وهنا $1.2\ m^3$ تكافيء 60% من حجم الجذع $(1.2/2.0 = 0.60)$ وبهذا، فإنّ 60% من حجم الجذع سوف يكون مغمورًا.



الشكل 10-16 جسم يطفو في حالة اتزان $F_B = mg$.

وعلى نحوٍ عام، عندما يطفو الجسم، تكون $F_B = mg$ التي يمكننا كتابتها بالصورة (الشكل 10-16).

$$\rho_F V_{displ}\, g = \rho_O V_O\, g$$

حيث V_O هو الحجم الكلّيّ للجسم، و V_{displ} هو حجم السائل المزاح (= حجم الجزء المغمور)، وهكذا

$$\frac{V_{displ}}{V_O} = \frac{\rho_O}{\rho_F}$$

أي أنّ الجزء المغمور من الجسم يُعطى كنسبة كثافة الجسم إلى كثافة المائع. إذا كان المائع ماء، فإنّ هذه النسبة تساوي الجاذبيّة النوعيّة للجسم.

نسبة الجزء المغمور من الجسم في الماء = كثافته النوعية.

المثال 10-9 تدريج الهيدروميتر

الهيدروميتر جهازٌ بسيطٌ يستعمل لقياس الجاذبيّة النوعيّة لسائل بمعرفة إلى أيّ عمقٍ يغوص الجهاز في السائل. يتكوّن الهيدروميتر (الشكل 17-10) من أنبوبٍ زجاجيّ، يوجد في أسفله ثقل، طوله $25.0\ cm$، ومساحة مقطعه $2.00\ cm^2$، وكتلته $45.0g$. فعلى أيّ بعد من النهاية يجب وضع إشارة 1.000؟

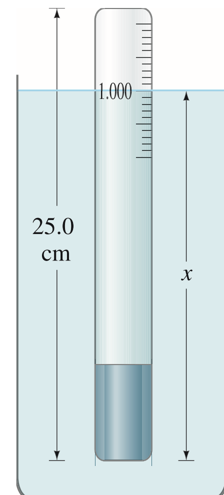
النّهج: سوف يطفو الهيدروميتر في الماء إذا كانت كثافته ρ أقلّ من كثافة الماء $\rho_w = 1.000\ g/cm^3$. نسبة الجزء الطافي من الهيدروميتر $(V_{displaced}/V_{total})$ تساوي نسبة الكثافة ρ/ρ_w.

الحلّ: كثافة الهيدروميتر هي

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{45.0\ g}{(2.00\ cm^2)(25.0\ cm)} = 0.900\ g/cm^3$$

وهكذا، عند وضعه في الماء، فإنّه يصل إلى الاتزان عندما يغمر 0.900 من حجمه. وبما أنّه منتظم المقطع، فإنّ $(0.900)(25.0\ cm) = 22.5\ cm$ من طوله سوف ينغمر. تعرف الجاذبيّة النوعيّة للماء بأنها تساوي 1.000. ولهذا، توضع العلامة عند $22.5\ cm$ من النهاية (الطرف).

الشكل 10-17 الهيدروميتر (المثال 10-9).



تمرين أ: على الهيدروميتر في (المثال 10-9)، هل العلامات فوق علامة 1.000 تمثّل قيمًا أكبر أم أصغر من كثافة السائل الذي يغمر فيه الهيدروميتر؟

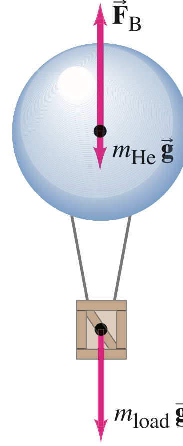
تطبيق الفيزياء

الجرف القاري – تغير شكل قشرة الأرض.

يُستفاد كذلك من مبدأ أرخميدس في الجيولوجيا؛ تبعًا لنظريّات تغيّر شكل قشرة الأرض والانسياق القارّي، فإنّ القارات تعوم على "بحر" من مائعٍ صخريٍّ قابلٍ للتشويه. ويمكن عمل حسابات مهمّة باستخدام نماذج بسيطة، نوردها في مسائل نهاية الفصل.

الوزن يتأثر بقوّة دفع الهواء.

يُعدّ الهواء كذلك مائعًا. لذا، فإنّه ينتج قوّة طفو (قوّة دفع). ويكون وزن الأجسام العاديّة أقلّ في الهواء ممّا هي عليه في الفراغ. ولأنّ كثافة الهواء قليلة، فإنّ الأثر في الأجسام الصلبة يكون قليلًا أيضًا. لكن هناك أجسامًا تطفو في الهواء مثل البالونات المملوءة بالهيليوم؛ لأنّ كثافة الهيليوم أقلّ من كثافة الهواء.



الشكل **10-18** (المثال 10-10).

المثال 10-10 بالون الهيليوم

ما حجم الهيليوم V المطلوب إذا كان على البالون رفع ثقل 180 kg (متضمنًا وزن البالون الفارغ)؟

النّهج: قوّة الطفو على بالون الهيليوم، F_B، التي تساوي وزن الهواء المزاح، يجب، على الأقل، أن تساوي وزن الهيليوم بالإضافة إلى وزن البالون والثقل. (الشكل 10-18). (الجدول 10-1) تعطي كثافة الهيليوم بـ $0.179\ kg/m^3$.

الحلّ: قوّة الطفو يجب أن تكون لها قيمةٌ دنيا وهي

$$F_B = (m_{He} + 180\ kg)g$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة بدلالة الكثافات باستعمال مبدأ أرخميدس كما يلي:

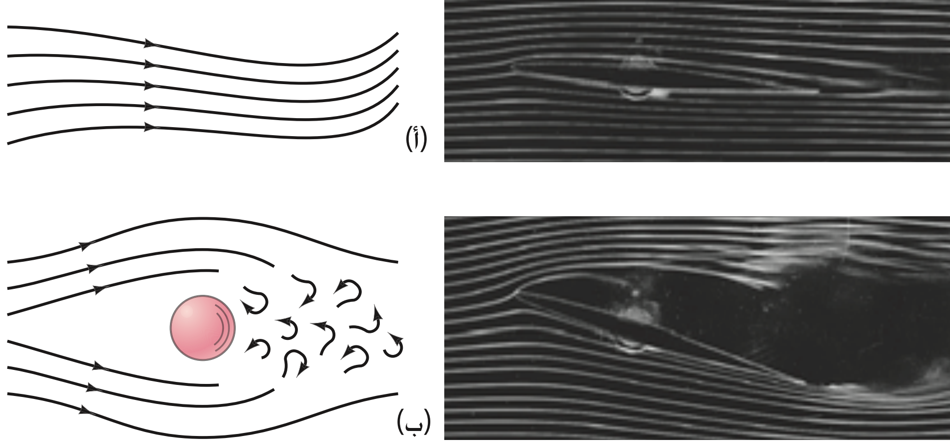
$$\rho_{air} V g = (\rho_{He} V + 180\ kg)g$$

ونحلّ هذه المعادلة لإيجاد V:

$$V = \frac{180\ kg}{\rho_{air} - \rho_{He}}$$

$$= \frac{180\ kg}{(1.29\ kg/m^3 - 0.179\ kg/m^3)} = 160\ m^3$$

ملحوظة: هذا هو الحجم الأصغر اللازم بالقرب من سطح الأرض؛ حيث $\rho_{air} = 1.29\ kg/m^3$، للوصول إلى ارتفاع كبير، نحتاج إلى حجم أكبر؛ لأنّ كثافة الهواء تقل مع زيادة الارتفاع.



الشكل 10-19 (أ) خطوط التيار، الجريان الانسيابي. (ب) الجريان الاضطرابي.

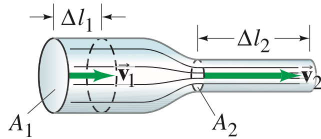
8-10 الموائع المتحركة؛ معدل الجريان ومعادلة الاستمرارية

نتحوّل الآن إلى موضوع الموائع المتحرّكة الذي يُدعى **ديناميكا الموائع** أو (خاصّةً إذا كان المائعُ ماءً) **هيدروديناميكا**. هناك جوانب متعدّدة من حركة الموائع لا تزال تحت الدراسة (مثل الجريان الاضطرابي كمظهر من مظاهر الفوضى هو موضوعٌ قيد الدراسة هذه الأيام بشكلٍ كبير). وبغضّ النظر، يمكننا فهم الكثير حول الموضوع مع فرضيّات مبسّطة.

يمكننا تمييز نوعين رئيسين من جريان الموائع. فإذا كان الجريان سلسًا، بحيث إنّ طبقات المائع المتجاورة تنزلق بسهولة عن بعضها، فإنّ هذا الجريان يُسمّى **خطوط التيار أو الجريان الانسيابي***. في الجريان الانسيابي يتبع كلّ جُسيمٍ من المائع مسارًا معيّنًا يُسمّى خطّ التيار، وهذه الخطوط جميعها لا تتقاطع (الشكل 10-19أ). وفوق سرعةٍ معيّنة، يصبح الجريان اضطرابيًّا. يتميّز الجريان الاضطرابي بدوائر غريبة الأطوار تشبه الدوّامات الصغيرة، تُدعى تيّارات دوّاميّة (الشكل 10-19ب).

تمتصّ هذه الدوّامات طاقةً كبيرة، وبالرغم من وجود احتكاكٍ داخليٍّ يُسمّى **اللزوجة** حتى في أثناء الجريان الانسيابي، فإنّها تكون كبيرةً بوجود الجريان الاضطرابي. إذا أضفت نقاطًا صغيرةً من الحبر أو صبغة الغذاء إلى سائلٍ يتحرك، فيمكنك أن تبيّن بسهولةٍ أنّ الجريان انسيابيٌّ أو اضطرابيٌّ.

دعنا نفترض الجريان الانسيابيّ المائع عبر أنبوبٍ يحتويه كما هو مبيّنٌ في (الشكل 20-10). سوف نحدّد أولًا كيف تتغيّر سرعة المائع عندما يتغيّر حجم الأنبوب. نعرّف معدّل تدفّقٍ بكتلة المائع Δm التي تعبر نقطةً معيّنةً لكلّ وحدة زمن Δt:



الشكل 10-20 تدفق المائع عبر أنبوب مختلف القطر.

$$\text{معدّل جريان الكتلة} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

في (الشكل 10-20) حجم المائع الذي يعبر النقطة 1 (أي خلال المساحة A_1) في زمن Δt هو $A_1\,\Delta l_1$؛ حيث Δl_1 هي المسافة التي يتحرّكها المائع في زمن Δt. وبما أنّ سرعة** المائع العابر للنقطة 1 هي $\Delta l_1/\Delta t$ فإنّ معدل جريان الكتلة $\Delta m_1/\Delta t$ خلال المساحة A_1 هو

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1\,\Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1\,A_1\,\Delta l_1}{\Delta t} = \rho_1\,A_1\,v_1$$

حيث $\Delta V_1 = A_1\,\Delta l_1$ حجم الكتلة Δm_1، و ρ_1 كثافة المائع. وبالطريقة نفسها عند النقطة 2 (خلال المساحة A_2) فإنّ معدّل الجريان هو $\rho_2\,A_2\,v_2$. وبما أنّه لا يوجد مائعٌ يدخل أو يخرج من جوانب الأنبوب، فإنّ معدّل الجريان عبر A_1 و A_2 يجب أن يكونا متساويين. لذا، فإنّ

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t}$$

أي أنّ

معادلة الاستمرارية (عام).

$$\rho_1\,A_1\,v_1 = \rho_2\,A_2\,v_2 \qquad \text{(4-10 أ)}$$

وتُسمّى هذه **معادلة الاستمرارية**.

* تعني كلمة لامينار "على صورة طبقات".
** لو لم تكن هناك لزوجة، فإنّ سرعة المائع ستكون ثابتةً عبر مقطع الأنبوب. الموائع الحقيقية لها لزوجة، وهذا الاحتكاك الداخليّ يسبب تدفّق الطبقات المختلفة للمائع بسرعاتٍ مختلفة. في هذه الحالة، تمثّل السرعتان v_1 و v_2 السرعة المتوسّطة عند كلّ مقطعٍ عرضيٍّ للأنبوب.

إذا كان المائع غير قابلٍ للانضغاط، فإنّ ρ لا تتغيّر مع الضغط. وهذا تقريبٌ ممتازٌ للسوائل تحت معظم الظروف (وأحيانًا للغازات أيضًا)، عندها $\rho_1 = \rho_2$ وتصبح معادلة الاستمرارية

معادلة الاستمرارية (ρ = ثابت).

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad [\rho=\text{ثابت}] \qquad \textbf{(10-4ب)}$$

تعبر الكميّة Av عن معدّل الجريان الحجمي (حجم المائع المار عند نقطةٍ في الثانية الواحدة)؛ $Av = A\,\Delta l/\Delta t = \Delta V/\Delta t$ حيث وبالوحدات الدولية $\mathrm{m^3/s}$. تخبرنا (المعادلة 10-4ب)أنّه حيثما تكون مساحة المقطع كبيرةً تكون السرعة صغيرة، وحيثما تكون المساحة صغيرةً تكون السرعة كبيرة. ويمكن إدراك أنّ ذلك معقولٌ بمراقبة جريان ماء النهر: فالنهر يجري بطيئًا في المروج المنبسطة حيث يكون عريضًا، لكنّه يتسارع ليصل سرعته الجارفة عند عبوره مدخلًا ضيّقًا.

تطبيق الفيزياء
جريان الدم

المثال 10-11 قدّر جريان الدم

يجري الدم في الإنسان من القلب إلى الشريان الأورطي، ومنه إلى الشرايين الرئيسة التي تتفرّع إلى شرايين صغيرة، تتفرّغ بدورها إلى شعيراتٍ دموية، (الشكل 10-21). ومن ثمّ يعود الدم إلى القلب عبر الأوردة. نصف قطر الشريان الأورطي حوالي $1.2\ \mathrm{cm}$ وسرعة الدم خلاله حوالي $40\ \mathrm{cm/s}$. نصف قطر الشعيرات الدموية حوالي $4 \times 10^{-4}\ \mathrm{cm}$، ويعبرها الدم بسرعة $5 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s}$ تقريبًا، خمّن عدد الأنابيب الشعرية في الجسم.

النّهج: نفرض أنّ كثافة الدم لا تتغيّر بصورةٍ ملموسةٍ من الأورطة إلى الشعيرات الدمويّة. ومن معادلة الاستمراريّة، فإنّ معدّل الجريان الحجميّ في الأورطة يجب أن يساوي معدّل الجريان الحجميّ عبر الأنابيب الشعريّة كلّها. المساحة الكليّة للأنابيب الشعريّة تساوي مساحة أنبوبةٍ شعريّةٍ واحدةٍ مضروبةً في عدد الأنابيب الشعرية N.

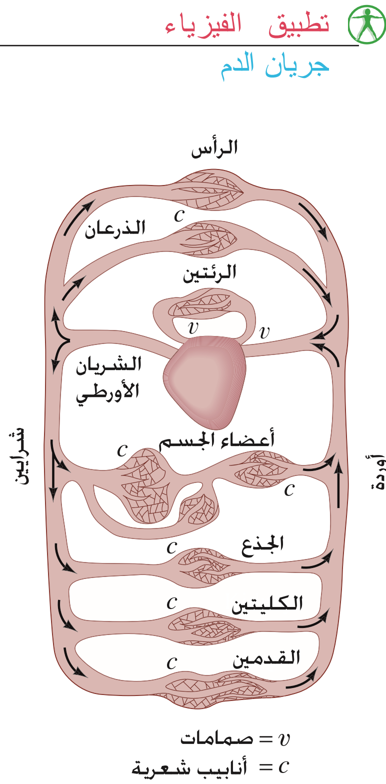
الحل: افرض أنّ A_1 مساحة الأورطة، و A_2 المساحة الكليّة للأنابيب الشعريّة التي يتدفّق عبرها الدم. عندها $A_2 = N\pi r_{\mathrm{cap}}^2$ ؛ حيث $r_{\mathrm{cap}} \approx 4 \times 10^{-4}\ \mathrm{cm}$ هو نصف القطر التقريبيّ للأنبوب الشعري. ومن معادلة الاستمراريّة (المعادلة 10-4) ، يكون عندنا

$$v_2 A_2 = v_1 A_1$$
$$v_2 N\pi r_{\mathrm{cap}}^2 = v_1 \pi r_{\mathrm{aorta}}^2$$

لذلك

$$N = \frac{v_1}{v_2}\frac{r_{\mathrm{aorta}}^2}{r_{\mathrm{cap}}^2} = \left(\frac{0.40\ \mathrm{m/s}}{5 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s}}\right)\left(\frac{1.2 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}}{4 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}}\right)^2 \approx 7 \times 10^9$$

أي حوالي عشرة بلايين أنبوبة شعرية.



الشكل 10-21
نظام الدورة الدموية للإنسان

تطبيق الفيزياء
مجرى التهوية.

المثال 10-12 مجرى التدفئة في غرفة

ما المساحة التي يجب أن يكون عليها مجرى التدفئة لهواءٍ يندفع بسرعة $3.0\ \mathrm{m/s}$ بحيث يتجدّد الهواء كلّ 15 دقيقةً في غرفةٍ حجمها $300\ \mathrm{m^3}$؟ افرض أنّ كثافة الهواء تبقى ثابتة.

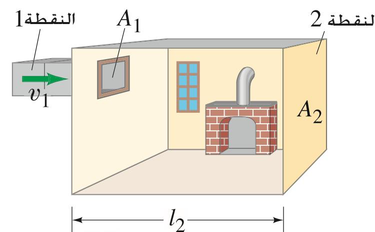
النّهج: نطبّق معادلة الاستمراريّة بكثافةٍ ثابتة، (المعادلة 10-4) . على الهواء الذي يتدفّق عبر مجرى النقطة 1 في (الشكل 10-22) ومن ثمّ عبر الغرفة (النقطة 2) . معدّل الجريان الحجميّ في الغرفة يساوي حجم الغرفة مقسومًا على زمن تجديد التهوية $15\ \mathrm{min}$.

الحل: افترض الغرفة عند مقطعٍ كبيرٍ للمجرى، (الشكل 10-22) ، وافرض كذلك أنّ الهواء مساوٍ لحجم الغرفة عند عبوره النقطة 2 في زمن $t = 15\ \mathrm{min} = 900\mathrm{s}$. وللسبب نفسه الذي استخدمناه عند استنتاج (المعادلة 10-4أ) ، نكتب $v_2 = l_2/t$، وبهذا $A_2 v_2 = A_2 l_2/t = V_2/t$. حيث V_2 حجم الغرفة. عندها تصبح معادلة الاستمراريّة $A_1 v_1 = A_2 v_2 = V_2/t$ ،

$$A_1 = \frac{V_2}{v_1 t} = \frac{300\ \mathrm{m^3}}{(3.0\ \mathrm{m/s})(900\ \mathrm{s})} = 0.11\ \mathrm{m^2}$$

إذا كان المجرى مربّعًا، فإنّ طول ضلعه $l = \sqrt{A} = 0.33\ \mathrm{m}$ أو $33\ \mathrm{cm}$.ومجرى مستطيل $20\ \mathrm{cm} \times 55\ \mathrm{cm}$ سوف يكون مناسبًا أيضًا.

الشكل 10-22 المثال 10-12.



9-10 معادلة برنولي

معادلة برنولي

هل تعجّبت يومًا كيف تستطيع الطائرة التحليق؟ أو كيف يتحرّك القارب الشراعيّ ضدّ الريح؟ هذان مثالان على مبدأ استنتجه دانيال برنولي (1700-1782) يتعلّق بحركة الموائع. في الجوهر، ينصّ **مبدأ برنولي على**: "حيث تكون سرعة المائع كبيرةً، يكون ضغطه منخفضًا، وحيث تكون سرعة المائع منخفضةً، يكون الضغط عاليًا. فمثلاً، لو قيس الضغطان عند النقطتين 1 و 2 (الشكل 10-20)، فسنجد أنّ الضغط سيكون أقلّ عند النقطة 2، لأنّ السرعة أكبر ممّا هي عليه عند النقطة 1؛ حيث السرعة أقلّ. وللوهلة الأولى يبدو ذلك غريبًا، فقد تتوقّع أنّ السرعة الكبيرة عند النقطة 2 تتضمّن ضغطًا أكبر، ولكن ذلك ليس صحيحًا. إذا كان الضغط عند النقطة 2 أعلى من الضغط عند النقطة 1، فإنّ هذا سوف يبطّىء المائع، ولكن الحقيقة هو أنّ المائع يتسارع عند انتقاله من 1 إلى 2. وهكذا، و يجب أن يكون الضغط عند النقطة 2 أقلّ من الضغط عند النقطة 1؛ ليتلاءم ذلك مع حقيقة أنّ المائع يتسارع.

[لتوضيح أيّ غموض: فإنّ المائع الأسرع سوف يؤثّر بقوّة أكبر في حاجز (عائق) يوضع في طريقه إذا أوقف المائع أو ارتدّ بعيدًا عن العائق. لكن ليس ذلك ما نعنيه بالضغط داخل المائع، كما أنّنا لا نناقش وجود عوائق تعترض المائع في جريانه، إنّنا نبحث جريانًا سلسًا انسيابيًّا. يؤثّر ضغط المائع في الاتجاهات كلّها بما في ذلك جدران الأنبوب أو سطوح المواد التي يتجاوزها المائع].

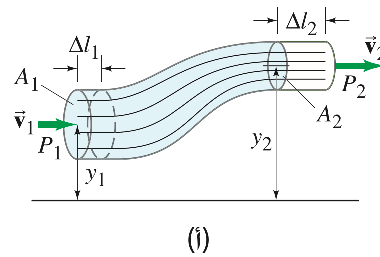
لقد طوّر برنولي معادلةً تعبّر عن هذا المبدأ بصورةٍ كمّيّة. ولاشتقاق معادلة برنولي: نفرض جريانًا انسيابيًّا ثابتًا، وأنّ المائع غير قابلٍ للانضغاط، وإهمال اللزوجة لصغرها. وعلى نحوٍ عام، نفرض أنّ المائع يتدفّق في أنبوبٍ مساحة مقطعه متغيّرة، ويختلف ارتفاعه بالنسبة إلى مستوًى مرجعيٍ، (الشكل 10-23). سوف نفترض حجم المائع في الجزء الملوّن، ونحسب الشغل اللازم لنقل هذا الحجم من موقعه في (الشكل 10-23 أ). إلى موضعٍ جديد (الشكل 10-23 ب). في هذه العمليّة، يندفع المائع عند النقطة 1 مسافة Δl_1، ويجبر المائع عند النقطة 2 ليتحرّك مسافة Δl_2 . المائع إلى يسار النقطة 1 يؤثّر بضغط P_1 في مقطع المائع، ويعمل بذلك شغلاً

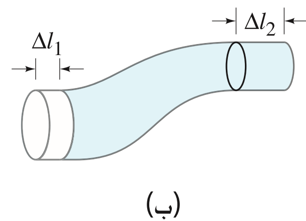
$$W_1 = F_1 \Delta l_1 = P_1 A_1 \Delta l_1$$

عند النقطة 2، الشغل المبذول على مقطع المائع هو

$$W_2 = -P_2 A_2 \Delta l_2$$

إنّ الإشارة السالبة موجودةٌ لأنّ القوّة المؤثّرة في المائع عكس اتجاه الحركة (وهكذا، يعمل المائع المبيّن بالألوان شغلًا على المائع إلى يمين النقطة 2). ويبذل شغلًا كذلك على المائع بواسطة قوّة الجاذبيّة. الأثر المحصّل لهذه العمليّة المبيّنة في (الشكل 10-23) هو تحريك كتلته m وحجمها $A_1\Delta l_1 (= A_2 \Delta l_2)$ لأنّ المائع غير انضغاطي، من النقطة 1 إلى النقطة 2، ولهذا يكون الشغل المبذول من الجاذبيّة





الشكل 10-23
جريان المائع: لاشتقاق معادلة برنولي.

$$W_3 = -mg(y_2 - y_1)$$

حيث y_1 و y_2 هما ارتفاعا مركز الأنبوب فوق مرجع معيّن (اختياري). في الحالة المبيّنة في (الشكل 10-23)، هذا الحدّ سالبٌ لأنّ الحركة باتّجاه الارتفاعٍ عكس قوّة الجاذبيّة. وهكذا يكون الشغل المبذول على المائع

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$
$$W = P_1 A_1 \Delta l_1 - P_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1$$

وتبعًا لمبدأ الشغل – الطاقة (بند 6-3)، فإنّ الشغل المحصّل المبذول على نظامٍ يساوي التغيّر في طاقته الحركيّة. وعليه فإنّ

$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 = P_1 A_1 \Delta l_1 - P_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1$$

الكتلة m حجمها $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$، لذلك يمكننا تعويض $m = \rho A_1 \Delta l_1 = \rho A_2 \Delta l_2$ ومن ثَمّ القسمة على $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$ للحصول على

$$\tfrac{1}{2}\rho v_2^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_1 - P_2 - \rho g y_2 + \rho g y_1$$

وهذا يُعاد ترتيبه بحيث نحصل على

معادلة برنولي

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2. \qquad \textbf{(10-5)}$$

وهذه هي **معادلة برنولي**. لأنّ 1 و 2 يمكن أن تكونا أيّ نقطتين على امتداد أنبوب الجريان، ويمكن كتابة هذه المعادلة كما يلي:

$$P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{ثابت}$$

عند كلّ نقطة من المائع؛ حيث y ارتفاع منتصف الأنبوب فوق مرجع معيّن . [لاحظ أنّه لو لم يكن هناك جريان $(v_1 = v_2 = 0)$، تعود عندها (المعادلة 10-5) إلى معادلة الهيدروستاتيك 10-3 ب أو 10-3 جـ].
وتُعدّ هذه المعادلة تعبيرًا عن قانون حفظ الطاقة؛ لأنّنا استنتجناها من معادلة الشغل – الطاقة.

تمرين C: عندما يمرّ الماء عبر أنبوبٍ مستوٍ من مقطعٍ ضيّقٍ للأنبوب إلى مقطعٍ أوسع. فكيف يتغيّر الضغط؟


تطبيق الفيزياء
نظام التدفئة بالماء الساخن

المثال 10-13 الجريان والضغط في نظام التدفئة بالماء الساخن يدور الماء الساخن في البيت في نظام تدفئة بالماء الساخن. إذا تمّ ضخّ الماء بسرعة 0.50 m/s عبر أنبوبٍ قطره 4.0 cm في التسوية تحت ضغط 3.0 atm، فماذا ستكون سرعة الجريان والضغط في أنبوبٍ قطره 2.6 cm في الطابق الثاني على ارتفاع 5.0 m؟ افرض أنّ الأنبوب دون تفرعات.

النّهج: نستعمل معادلة الاستمراريّة بكثافةٍ ثابتةٍ لتحديد سرعة الجريان في الطابق الثاني، ثم معادلة برنولي لإيجاد الضغط.

الحل: نأخذ v_2 في معادلة الاستمراريّة، (المعادلة 10-4) ، كسرعة الجريان في الطابق الثاني، و v_1 سرعة الجريان في الأرضيّة. وبما أنّ المساحات تتناسب مع مربع أنصاف الأقطار $(A = \pi r^2)$، فإنّ

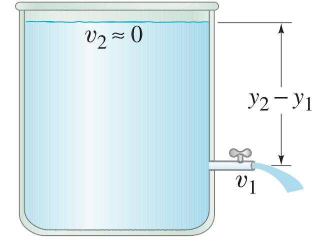
$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} = \frac{v_1 \pi r_1^2}{\pi r_2^2} = (0.50\,\text{m/s})\frac{(0.020\,\text{m})^2}{(0.013\,\text{m})^2} = 1.2\,\text{m/s}$$

ولحساب الضغط في الطابق الثاني؛ نستخدم معادلة برنولي

$$\begin{aligned}
P_2 &= P_1 + \rho g(y_1 - y_2) + \tfrac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \\
&= (3.0 \times 10^5\,\text{N/m}^2) + (1.0 \times 10^3\,\text{kg/m}^3)(9.8\,\text{m/s}^2)(-5.0\,\text{m}) \\
&\quad + \tfrac{1}{2}(1.0 \times 10^3\,\text{kg/m}^3)[(0.50\,\text{m/s})^2 - (1.2\,\text{m/s})^2] \\
&= (3.0 \times 10^5\,\text{N/m}^2) - (4.9 \times 10^4\,\text{N/m}^2) - (6.0 \times 10^2\,\text{N/m}^2) \\
&= 2.5 \times 10^5\,\text{N/m}^2 = 2.5\,\text{atm}.
\end{aligned}$$

ملحوظة: يساهم حدّ السرعة بكمية ضئيلة في هذه الحالة.

10-10 تطبيقات على مبدأ برنولي: من تورشللي إلى الطائرات، كرات البيسبول والأسكيمية



الشكل 10-24 نظرية تورشللي: $v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$

يمكن تطبيق معادلة برنولي في مواقف عديدة. أحد الأمثلة هو حساب السرعة v_1 لسائلٍ يتدفّق من صنبورٍ عند قاعدة خزّان، (الشكل 10-24). نختار النقطة 2 في المعادلة 10-4 لتكون السطح العلويّ للسائل. وبفرض أنّ نصف قطر السطح كبيرٌ مقارنةً بنصف قطر الصنبور، فإنّ v_2 تساوي صفرًا تقريبًا. النقطتان 1 (الصنبور) و 2 (السطح العلوي) مفتوحتان للجوّ الخارجيّ. لذا، فإنّ الضغط عند النقطتين يساوي الضغط الجوي: $P_1 = P_2$ عندئذٍ، تصبح معادلة برنولي

$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = \rho g y_2$$

أو:

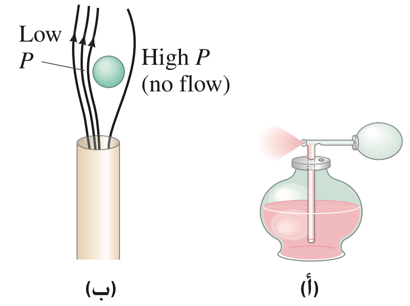
$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)} \qquad \textbf{(6-10)}$$

نظرية تورشللي

تُسمّى هذه النتيجة **نظرية تورشللي**. وعلى الرغم من أنّها تبدو حالةً خاصّةً لمعادلة برنولي، إلّا أنّها اكتشفت قبل ذلك بقرنٍ من الزمن على يد إيفانجلستا تورشللي. تشير (المعادلة 10-6) إلى أنّ السائل يخرج من الصنبور بالسرعة نفسها لجسمٍ يسقط سقوطًا حرًّا من على الارتفاع نفسه. ويجب ألّا يبدو هذا غريبًا لأنّ اشتقاق معادلة برنولي يستند إلى قانون حفظ الطّاقة.

وتظهر حالةٌ خاصّةٌ أخرى من معادلة برنولي عندما يتدفّق سائلٌ أفقيًّا من غير تغيّر يُذكر في الارتفاع؛ أي أنّ $y_1 = y_2$ عندها تصبح (المعادلة 10-5)

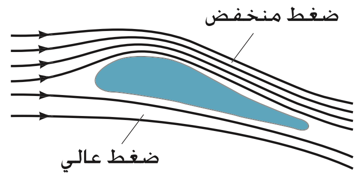
$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad \textbf{(7-10)}$$



الشكل 10-25 أمثلة على معادلة برنولي: (أ) البخاخ، (ب) كرة التّنس في تيار الهواء.

التي تقول لنا بصورةٍ كمّيّة إنّ السرعة تكون عاليةً حيث الضغط منخفضٌ والعكس صحيح. وهذا يفسّر كثيرًا من الظواهر العامة، بعضها موضّح في (الأشكال من 10-25 إلى 10-31) . الضغط في الهواء المنفوخ بسرعةٍ كبيرةٍ عند فوهة بخاخ العطر (الشكل 10-25أ) أقلّ من ضغط الهواء العادي المؤثّر في سطح السائل في القنينة. لذلك، يدفع ضغط الهواء في القنينة العطر إلى أعلى الأنبوب بسبب قلّة الضغط عند الفوهة. يمكن أن تجعل كرة تنس الطاولة تطفو فوق تيّارٍ من الهواء المندفع (بعض المكانس الكهربائيّة يمكن أن تنفث الهواء)، (الشكل 10-25ب)، إذا بدأت الكرة بالابتعاد عن تيار الهواء، فإنّ الضغط الأعلى في الهواء الساكن يدفع الكرة لترجع إلى تيار الهواء.

الشكل 10-26 رفع جناح الطائرة. نحن في الإطار المرجعي على الجناح، ونرى مرور الهواء حولنا.



جناحا الطائرة والرفع الديناميكي

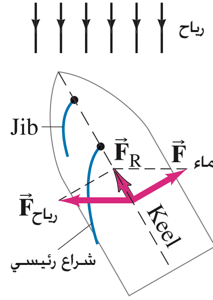
تطبيق الفيزياء
الطائرات والرفع الديناميكي

تتأثر الطائرات بقوّة "رفع" على جناحيها، تبقيها عاليةً في الهواء، إذا كانت تتحرّك بسرعةٍ عاليةٍ بالنسبة إلى الهواء، ويرفع الجناح نحو الأعلى بزاويةٍ صغيرة "زاوية الهجوم"، كما في (الشكل 10-26) ؛ حيث خطوط التيّار الهوائيّ تندفع بالقرب من الجناح. (نحن في المستوى المرجعيّ للجناح، كما لو كنّا نجلس على الجناح.) إنّ الانحناء إلى الأعلى بالإضافة إلى التدوير في الحافّة العليا للجناح يسبّب دَفْعَ خطوط التيّار إلى الأعلى لتتجمّع فوق الجناح. المساحة بين خطوط الجريان لتدفّق الهواء بين أيّ خطيّ جريان سوف تقلّ كلّما اقتربت الخطوط من بعضها. وبالرجوع إلى معادلة الاستمراريّة $(A_1v_1 = A_2v_2)$، فإنّ سرعة الهواء تزداد فوق الجناح؛ لأنّ السرعة فوقه أعلى من السرعة تحته. لذا، يكون الضغط أقلّ فوقه من الضغط تحته (مبدأ برنولي). وعليه، فإنّ هناك قوّةً محصّلة نحو الأعلى على الجناح تُسَمّى **الرفع الديناميكي**. تشير التجارب إلى أنّ سرعة الهواء فوق الجناح تصل إلى ضعف السرعة تحته. (الاحتكاك بين الهواء والجناح يولّد قوّة انسياقٍ نحو الخلف، يجب التغلّب عليها بواسطة المحرّكات).

الجناح المنبسط، أو ذلك ذو المقطع المتماثل، سوف يتأثّر بالدفع ما دام الجزء الأماميّ للجناح مائلًا إلى الأعلى (زاوية الهجوم والمواجهة). وسوف يتأثّر الجناح المبيّن في (الشكل 10-26) بالرفع حتى لو كانت زاوية المواجهة صفرًا؛ لأنّ السطح العلويّ المدوّر سوف يدفع الهواء نحو الأعلى، ضاغطًا خطوط الجريان على بعضها. ويمكن أن تطير الطائرات مقلوبة، متأثّرةً بالرفع، إذا كانت زاوية المواجهة كافيةً لانحراف خطوط المواجهة نحو الأعلى ومتقاربةً من بعضها.

تأخذ الصورة الخطوط الإنسيابية بعين الاعتبار، لكن إذا كانت زاوية المواجهة أكبر من 15^o ، فسينشأ جريان اضطرابي (الشكل 10-19ب) يؤدي إلى قوى جرٍّ نحو الخلف وأقلّ قوّة رفع، وهذا يسبّب انهيار الجناح وسقوط الطائرة.

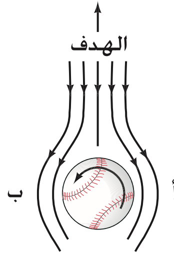
ومن جهةٍ أخرى، فإنّ ميل الجناح إلى الأعلى يعني أنّ الهواء المتحرّك أفقيًّا أمام الجناح للأسفل: إنّ التغيّر في زخم جزيئات الهواء المرتدّة يؤدّي إلى قوّةٍ نحو الأعلى على الجناح (قانون نيوتن الثالث).



الشكل 10-27 يبحر القارب الشراعي ضد الرياح.

القوارب الشراعية

بوضع الشراع بزاوية، كما هو مبين في (الشكل 10-27) . يتحرّك الهواء بسرعة فوق السطح الأمامي المنتفخ للشراع، والهواء الساكن نسبيًّا خلف الشراع يولّد ضغطًا أكبر، ممّا ينتج قوّةً محصّلةً على الشراع، $\vec{F}_{wind}$. هذه القوّة ستؤدّي بالقارب إلى التحرّك بصورةٍ جانبيّةٍ لولا وجود العارضة الرئيسة الممتدة رأسيًّا من أسفل القارب تحت الماء. يولّد الماء قوّةً عموديّةً تقريبًا على العارضة الرئيسة. والقوّة المحصّلة للقوّتين ($\vec{F}_R$) تكون موجّهةً نحو الأمام كما هو مبيّن.



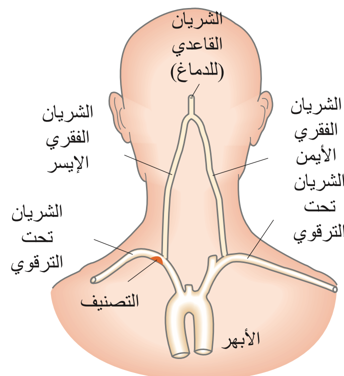
الشكل 10-28 النظر إلى الأسفل على كرة بيسبول مقذوفة نحو الهدف. نحن في المرجع المرافق للكرة، والهواء يمر بجانبنا.

التفاف كرة (القاعدة) البيسبول

لماذا يمكن تفسير التفاف كرة البيسبول التي تدور في أثناء قذفها (أو كرة التّنس) باستخدام مبدأ برنولي. ومن السهل وضع أنفسنا في مرجع كرة البيسبول، والهواء يندفع حولنا، مثلما أوردنا عند الحديث عن جناح الطائرة.

افرض أنّ الكرة تدور بعكس اتّجاه عقارب الساعة إذا نظرنا إليها من الأعلى، (الشكل 10-28). هناك طبقةٌ رقيقةٌ من الهواء (الطبقة على الحدود) تجري مع الكرة. وننظر إلى الكرة نحو الأسفل عند النقطة A، (الشكل 10-28)، هذه الطبقة الحدّيّة تؤدّي إلى إبطاء الهواء القادم. وعند النقطة B ، فإنّ الهواء الذي يدور مع الكرة يضيف سرعته إلى سرعة الهواء القادم. لذا، فإنّ سرعة الهواء عند B أكبر ممّا هي عليه عند A. وتعني السرعة الأعلى عند B أنّ الضغط أقلّ عند B مما هو عليه عند A، وهذا ينتج قوّةً محصّلةً نحو B. وهكذا ينحني مسار الكرة نحو اليسار (كما يبدو للرامي).

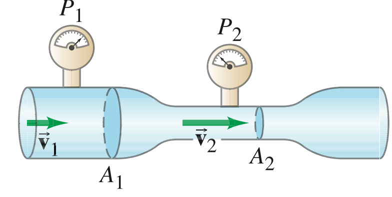
الشكل 10-29 خلف الرأس والكتف تظهر الشرايين المؤدية إلى الدماغ والذراعين. سرعة الدم العالية عند تفرع الشريان تحت الترقوة الأيسر بسبب نقص الضغط، يؤدي إلى جريان دم عكسي (نحو الأسفل) وهذا ينتج TIA (الأسكيمية).



نقص الدم الوارد إلى الدماغ-TIA (الأسكيمية العابرة)

في الطبّ، أحد تطبيقات مبدأ برنولي هو تفسير TIA (الأسكيمية العابرة)، وهي نقص ورود الدم إلى الدماغ بصورةٍ مؤقّتة. الشخص الذي يعاني من TIA يعاني أعراضًا، مثلَ: الدوّار، الرؤية المزدوجة، ألم في الرأس، ضعف في الأطراف. ويمكن أن تحدث TIA كما يلي: يتدفّق الدم عادةً إلى الدماغ من الخلف عبر اثنين من الأورطة الفقاريّة – كلّ واحد على أحد جانبي الرقبة – التي تتحد لتكون الأورطة تحت الدماغ مباشرة، (الشكل 10-29) . تصدر الأورطة الفقاريّة عن الشريان تحت الترقوي قبل أن يذهب الأخير إلى الذراع. عندما يتمّ تدريب الذراع بشدة، فإنّ الدم يندفع بقوّةٍ لتلبية حاجة عضلات الذراع. إذا كان أحد الشريانين تحت الترقوي مغلقًا جزئيًّا (تصلّب الشريان)، فستكون سرعة الدم أكبر على هذا الجانب لتزويد الدم اللازم. (تذكّر معادلة الاستمرارية: مساحة أقلّ تعني سرعة أكبر). لكن السرعة الزائدة قرب فتحة الأورطة الفقاري تؤدّي إلى ضغط أقلّ (معادلة برنولي). وهكذا، فإنّ الدم المرتفع في الأورطة "الجيدة" سوف ينحرف ليذهب إلى الأورطة الأخرى؛ حيث الضغط هناك أقلّ، بدل أن يذهب إلى الدماغ. وهكذا يقلّ تزويد الدم للدماغ.

تطبيقات أخرى



الشكل 10-30 مقياس فينتوري

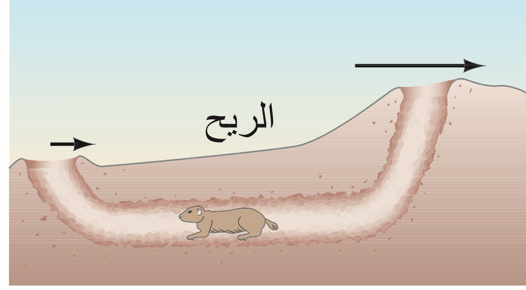
تطبيق الفيزياء
الدخان نحو أعلى المدخنة.

تطبيق الفيزياء
دورة الهواء تحت الأرض للحيوانات التي تعمل الجحور.

أنبوب فينتوري هو في الأساس أنبوب يحتوي على جزءٍ ضيّقٍ (الحنجرة). يتسارع الهواء المتدفّق عند مروره عبر هذا الاختناق، ولذلك يكون الضغط منخفضًا عبر هذه الحنجرة. يُستعمل مقياس فينتوري (الشكل 10-30) لقياس سرعة جريان الغازات والسوائل بما في ذلك سرعة الدم في الشريان.

لماذا يرتفع الدخان في المدخنة؟ إنّ ذلك يعود جزئيًّا إلى أنّ الهواء الساخن يرتفع (لأنّه أقلّ كثافةً ولذلك يطفو). ولكن مبدأ برنولي له دورٌ كذلك. عندما تهبّ الرياح قرب فوّهة المدخنة، فإنّ الضغط هناك أقلّ من داخل البيت. وهكذا يدفع الهواء والدخان إلى أعلى المدخنة بواسطة الضغط العالي داخل البيت. حتى في الليالي التي يكون فيها الهواء ساكنًا، فإنّ هناك حركةً كافيةً للهواء قرب قمّة المدخنة تكفي لدفع الهواء والدخان إلى الأعلى.

إذا كان على السلحفاة الأمريكيّة، وكلب المروج، والأرانب والحيوانات الأخرى التي تعيش في جحورٍ تحت الأرض، أن تتجنب الاختناق، فيجب أن يدور الهواء في جحورها. تحتوي هذه الجحور على الأقلّ على مدخلين (الشكل 10-31)، وتختلف سرعة جريان الهواء عبر الفتحات المختلفة. وهذا ينتج اختلافًا طفيفًا في الضغط يدفع جريان الهواء عبر الجحور بسبب مبدأ برنولي. يكون جريان الهواء قويًّا إذا كانت إحدى الفتحات أعلى من الأخرى (تبنى الحيوانات عادة كومة صغيرة)؛ لأنّ سرعة الهواء تزداد مع الارتفاع.



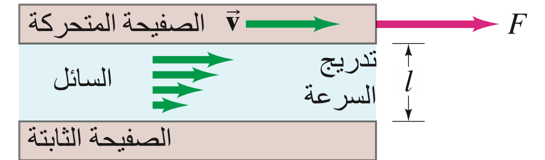
الشكل 10-31 يفسر مبدأ برنولي جريان الهواء في الجحور تحت الأرض.

تهمل معادلة برنولي آثار الاحتكاك (اللزوجة) وقابليّة المائع للانضغاط. إنّ الطاقة التي تتحوّل إلى طاقةٍ داخلية (أو طاقة وضع) بسبب الانضغاط وطاقةٍ حراريّةٍ بسبب الاحتكاك يمكن أخذها بالحسبان بإضافة حدودٍ جديدةٍ إلى (المعادلة 10-5). هذه الحدود يصعب حسابها نظريًّا. لذا، يتمّ تحديدها تجريبيًّا. إنّها لا تؤثّر بصورةٍ مهمةٍ في التفسيرات الواردة أعلاه للظواهر المختلفة.

* 10-11 اللزوجة

إنّ الموائع الحقيقية لديها مقدارٌ معيّنٌ من الاحتكاك الداخليّ بين الجزيئات يُدعى اللزوجةَ، كما ذكرنا في (البند 10-8). توجد اللزوجة في السوائل والغازات، وهي في الواقع قوّة احتكاك بين الطبقات المتجاورة للمائع عندما تتحرّك واحدةٌ بالقرب من الأخرى. وفي السوائل، تعود اللزوجة إلى قوى كهربائيّةٍ لاصقةٍ بين الجزيئات. وتوصف اللزوجة عادةً بواسطة معامل اللزوجة η، (الحرف اليوناني الصغير إيتا)، الذي يُعرف بالطريقة الآتية: تُوضع طبقةٌ رقيقةٌ من المائع بين صفيحتين. تبقى إحدى الصفيحتين ثابتة، في حين يسمح للأخرى بالحركة. (الشكل 10-32). المائع الملامس مباشرةً لكلّ صفيحةٍ يمسك بالصفيحة بواسطة قوى الالتصاق بين جزيئات كلٍّ من المائع والصفيحة. وهكذا يتحرّك السطح العلويّ للمائع بالسرعة v نفسها التي تتحرك بها الصفيحة العليا، في حين يبقى الجزء الملامس للصفيحة الساكنة ساكنًا. الطبقة الساكنة من المائع تعيق حركة الطبقة التالية الملاصقة لها التي تعيق الطبقة اللاحقة لها، وهكذا. لذا، تتغيّر السرعة من صفر إلى v كما هو مبين. وتُسمّى الزيادة في السرعة على المسافة التي يحصل خلالها هذا التغيّر تدرّجَ السرعة. وقد وُجد لسائل ما أنّ القوّة اللازمة لتحريك الصفحة العليا التي تُدعى F تتناسب مع مساحة سطح المائع الملاصق لها A والسرعة "v" وعكسيًّا مع البعد بين الصفيحتين v/l. وللموائع المختلفة، $F \propto vA/l$ كلّما كان المائع أكثر لزوجةً كانت القوّة اللازمة أكبر.

الشكل 10-32
تحديد اللزوجة



وهكذا، يعرف ثابت التناسب في هذه المعادلة بمعامل اللزوجة، η

$$F = \eta A \frac{v}{l} \qquad (8\text{-}10)$$

وإذا كتبنا المعادلة بدلالة η، فإنّنا نجد $\eta = Fl/vA$ الوحدة الدوليّة لـ η هي $N.s/m^2 = Pa$ (باسكال. ثانية) في نظام cgs الوحدة هي $dyne.s/cm^2$ التي تُدعى عادة بـ بويز (P). تُعطى اللزوجات عادة بـ $(1\ cP = 10^{-2}\ P)$ centipoise. يبين (الجدول 10-3)معامل اللزوجة لموائع مختلفة، وكذلك درجة الحرارة محددة؛ لأنّ لها أثرًا قويًّا. وتقل لزوجة السوائل، مثل زيت السيارات مثلًا، بسرعةٍ مع زيادة درجة الحرارة**.

الجدول 10 - 3 معاملات اللزوجة

المائع (درجة الحرارة °C)	معامل اللزوجة η(Pa.s)*
الماء (0°)	1.8×10^{-3}
(20°)	1×10^{-3}
(100°)	0.3×10^{-3}
الدم (37°)	$\approx4\times10^{-3}$
بلازما الدم (37°)	$\approx1.5\times10^{-3}$
كحول الإيثايل (20°)	1.2×10^{-3}
زيت الموتور (30°)	200×10^{-3}
(SAE 10)	1500×10^{-3}
جليسرين (20°)	0.018×10^{-3}
الهواء (20°)	0.009×10^{-3}
الهيدروجين (0°)	0.013×10^{-3}
بخار الماء (100°)	

* 1 Pa.s = 10 P = 1000 cP

* 12-10 الجريان في الأنابيب؛ معادلة بوسيلي، جريان الدم

إذا كان المائع عديم اللزوجة، فإنّه يجري عبر أنبوبٍ مستوٍ دون الحاجة إلى قوّة تدفعه. تؤثّر اللزوجة كنوع من الاحتكاك. لذا، فمن الضروري وجود فرقٍ في الضغط بين نهايتي أنبوبٍ مستوٍ لاستمرار الجريان لأيّ مائع حقيقي، سواءً أكان ماءً أم زيتًا في أنبوب، أم دمًا في الدورة الدموية للإنسان.

إنّ معدّل جريان المائع في أنبوبٍ مثني يعتمد على لزوجة المائع، وفرق الضغط، وأبعاد الأنبوب. لقد حدّد العالِم الفرنسي بوسيلي (1799-1869)، الذي كان مهتمًّا بفيزياء دورة الدم (الذي سُمّيت وحدة اللزوجة "بويز" تكريمًا له)، كيفيّةَ تأثير المتغيرات في معدّل الجريان لمائع غير قابلٍ للانضغاط ويجري انسيابيًّا عبر أنبوبٍ أسطواني.

تُعرف نتيجته بمعادلة بوسيلي، وهي

معادلة بوسيلي لمعدل الجريان عبر أنبوب.

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \qquad (9\text{-}10)$$

حيث R نصف القطر الداخليّ للأنبوب، و L طول الأنبوب، و$P_1 - P_2$ الفرق في الضغط بين نهايتيه، و η معامل اللزوجة، و Q معدّل الجريان الحجمي (حجم المائع المار عبر نقطةٍ في الثانية). (المعادلة 10-9) تنطبق على الجريان الانسيابيّ فقط.

تخبرنا معادلة بوسيلي أنّ معدّل الجريان Q يتناسب مع تدرّج الضغط $(P_1 - P_2)/L$، ويتناسب عكسيًّا مع لزوجة المائع. وهذا بالضبط ما نتوقعه. ولكن قد يكون غريبًا اعتماد Q على القوّة الرابعة لنصف قطر الأنبوب. إنّ هذا يعني أنّه للتدرّج نفسه في الضغط، لو نقص نصف قطر الأنبوب إلى النصف، فإنّ معدل الجريان ينقص كنسبة 16؛ أي أنّ معدل الجريان يتأثّر بشدّةٍ عند تغيّرٍ طفيفٍ في نصف القطر.

تطبيق الفيزياء

الطب – جريان الدم وأمراض القلب.

مثالٌ مهمٌّ لهذا العامل R^4 هو جريان الدم في جسم الإنسان. تنطبق المعادلة السابقة على جريانٍ انسيابيٍّ لمائع غير انضغاطيٍّ وبمعامل لزوجة ثابت. لذلك، لا تكون المعادلة دقيقةً لدمٍ جريانه لا يخلو من الاضطراب، والذي يحتوي على خلايا دم (قطرها يساوي قطر الأنبوب تقريبًا). لذا، تعتمد η - إلى درجةٍ معيّنة - على سرعة جريان الدم v. ومع ذلك تعطي معادلة بوسيلي جريان الدم بواسطة عضلات تحيط بالشرايين. إنّ انقباض هذه العضلات يقلّل القطر لأيّ شريان، وبسبب الحد R^4 في (المعادلة 10-9)، يقلّ معدّل الجريان بشدّةٍ لأيّ تغيّرٍ طفيفٍ في نصف القطر.

** تشير جمعية المهندسين الميكانيكيين إلى أرقامٍ تمثّل لزوجة الزيوت: فمثلًا ($SA\ E\ 30$) أكثر لزوجة من $10wt$. الزيوت متعدّدة الدرجات، مثل 20-50 تعني اللزوجة عند تغيّر درجة الحرارة. فمثلًا، 20 تعني اللزوجة عندما يكون ساخنًا، و50 عندما يكون باردًا.



(ب)



(أ)

الشكل 10-33 المقطع العرضي لشريان شخص (أ) سليم. (ب) مغلق جزئيا بسبب التصلب.

سنتناول الآن موضوعًا آخر، وهو أنّ نصف قطر الشرايين ينقص بسبب تصلبها (الشكل 10-33) وتراكم الكولسترول. فعند حدوث ذلك، لا بدّ من زيادة تدرّج الضغط للحصول على المعدّل نفسه لجريان الدم. إذا نقص نصف القطر إلى النصف، فعلى القلب زيادة تدرّج الضغط بمعدّل 16 مرّةً للوصول إلى المعدّل نفسه لجريان الدم. وعلى القلب العمل بجهودٍ أكبر بكثيرٍ تحت هذه الظروف، ولكنّه لا يستطيع الوصول إلى معدّل جريان الدم الأصليّ عادةً. لذلك، فإنّ ارتفاعَ ضغط الدم مؤشّرٌ على أنّ القلب يعمل أكثر، وأنّ معدّل جريان الدم أقلّ.

* 10-13 التوتر السطحي والخاصية الشعرية



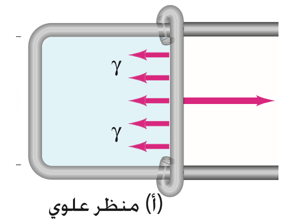
الشكل 10-34 قطرات الماء الكروية، الندى على نصل ورقة عشب.

التوتر السطحي

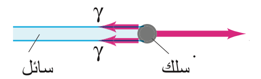
يتصرّف سطح السائل الساكن بطريقةٍ مثيرةٍ للاهتمام، تقريبًا كما لو كان غشاءً مطوطًا تحت الشدّ. ومثال ذلك، قطرة ماءٍ عند نهاية صنبورٍ آخذٍ في التنقيط، أو قطرة ندى معلّقة بنهاية فرع نبتةٍ في الصباح الباكر (الشكل 10-34)، تتشكّل بصورةٍ كرويّةٍ تقريبًا كما لو كانت بالونًا صغيرًا مملوءًا بالماء. يمكن أن تجعل إبرةً من الفولاذ تطفو على سطح الماء رغم أنّها أكثر كثافةً منه. يتصرف سطح السائل كما لو كان مشدودًا، وهذا الشدّ الذي يعمل في السطح ناجٌ من قوى التجاذب بين الجزيئات. يُسَمّى هذا الأثرُ **التوترَ السطحيّ**. وبتحديدٍ أكبر، هناك كميّةٌ تُسَمّى التوتّر السطحي γ (الحرف اليوناني الصغير جاما) تُعرف بالقوّة F لكلّ وحدة طول L التي تؤثّر عموديًّا في أيّ خطٍ أو قطعٍ في سطح السائل، تؤدّي إلى غلق السطح

$$\gamma = \frac{F}{L}. \qquad \textbf{(10-10)}$$

لفهم ذلك: افترض الأداة على شكل حرف U المبيّنة في (الشكل 10-35)، التي تحتوي على غشاءٍ رقيقٍ من السائل. بسبب التوتّر السطحي، تلزم قوّة F لسحب السلك القابل للحركة، ومن ثمّ زيادة مساحة سطح السائل. إنّ السائل داخل هذا الإطار من السلك هو غشاءٌ رقيقٌ له سطحٌ علويٌّ وآخر سفلي. وهكذا، فإنّ طول السطح يكون قد زاد بـ $2L$، والتوتّر السطحيّ هو $\gamma = F/2L$. إنّ أداةً بسيطةً كهذه يمكن استعمالها لقياس معامل التوتر السطحيّ لسوائل متفرّقة. يساوي التوتّرُ السطحيُّ للماء $0.072 \mathrm{N/m}$ عند درجة $20^{\circ}\mathrm{C}$. (الجدول 10-4) يعرض التوتّر السطحيّ لعدّة سوائل. لاحظ أنّ لدرجة الحرارة تأثيرًا مهمًّا في التوتّر السطحيّ.



(أ) منظر علوي



(ب) منظر جانبي (مكبّر)

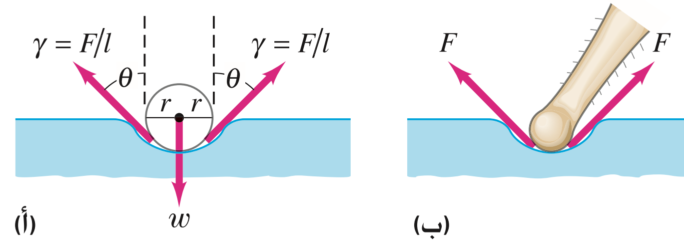
الشكل 10-35 جهاز سلك له شكل U يمسك غشاء من السائل لقياس التوتر السطحي.

وبسبب التوتّر السطحيّ، تستطيع بعض الحشرات (الشكل 10-36) أن تسير على الماء، كما أنّ أجسامًا كثافتها أكبر من كثافة الماء، مثل إبرة فولاذية تستطيع أن تطفو فوق سطح الماء.



الشكل 10-36 حشرة على سطح الماء.

الجدول 10-4 كثافة بعض المواد	
المادة	التوتر السطحي (N/m)
الزئبق (20°C)	0.44
الدم (37°C)	0.058
بلازما الدم (37°C)	0.073
كحول الإيثايل (20°C)	0.023
الماء (0°C)	0.076
الماء (20°C)	0.072
الماء (100°C)	0.059
البنزين (20°C)	0.029
محلول الصابون (20°C)	0.025 ≈
الأكسجين (-193°C)	0.016



الشكل 10-37 التوتر السطحي يؤثر في: (أ) كرة . (ب) ساق حشرة، (المثال 10-14).

الشكل 10-37 أ يبيّن كيف أنّ التوتّر السطحيّ يمكن أن يحمل وزنًا لجسم مقداره w. في الواقع يغطس الجسم قليلًا في المائع، لذلك w هي "الوزن الفاعل" لذلك الجسم – إنّه وزنه الحقيقيّ مطروحًا منه قوّة الطفو.

المثال 10-14 قدّر حشرة تمشي على الماء

قاعدة رِجل الحشرة كرويّة الشكل تقريبًا، وبنصف قطر حوالي 2.0×10^{-5} m. كتلة الحشرة $0.003g$ محمولة بالتساوي على ستّ أرجل . خمّن الزاوية θ (انظر الشكل 10-37) لحشرةٍ على سطح الماء. افرض أنّ درجة حرارة الماء تساوي 20^oC.

النّهج: بما أنّ الحشرة متّزنةٌ، فإنّ قوّة التوتّر السطحيّ نحو الأعلى تساوي قوّة سحب الجاذبيّة نحو الأسفل على كلّ رِجل.

الحلّ: نفرض أنّ لكلّ رِجل قوّة توتّرٍ سطحيٍّ تؤثّر حول دائرةٍ نصف قطرها r عند زاوية θ، كما هو مبين في (الشكل 10-37). إنّ المركبة الرأسيّة، $\gamma \cos \theta$، فقط هي التي تؤثّر بحيث توازن mg. لذلك، نضع الطول L في (المعادلة 10-10) يساوي محيط الدائرة، $L \approx 2\pi r$، ثمّ تكون القوّة المحصّلة نحو الأعلى بسبب التوتّر السطحيّ كما يلي:

$F_y \approx (\gamma \cos \theta)L \approx 2\pi r\gamma \cos \theta$. ومن ثمّ نعوّض هذه القوّة بحيث تساوي سدس وزن الحشرة؛ لأنّ لها ستّ أرجل:

$$2\pi r\gamma \cos \theta \approx \tfrac{1}{6}mg$$

$$(6.28)(2.0 \times 10^{-5}\,\text{m})(0.072\,\text{N/m}) \cos \theta \approx \tfrac{1}{6}(3.0 \times 10^{-6}\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)$$

$$\cos \theta \approx \frac{0.49}{0.90} = 0.54.$$

لذلك $\theta \approx 57°$ لو كان $\cos \theta$ أكبر من 1، فإنّ التوتّر السطحيَّ لا يكون كافيًا لدعم وزن الحشرة.

ملحوظة: إنّ تقريبنا يهمل قوّة الطفو، كما يهمل أيّ فرقٍ بين نصف قطر "رِجل" الحشرة، ونصف قطر انخفاض السطح.

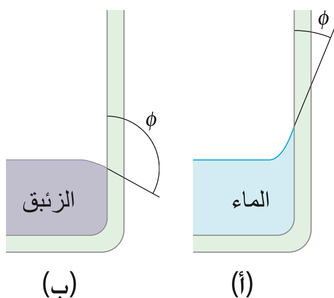
تطبيق الفيزياء

الصابون و المنظفات

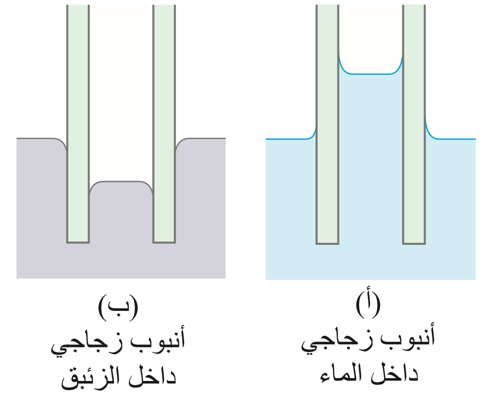
الخاصية الشعرية

إنّ الصابون والمنظفات تقلّل التوتّر السطحي للماء؛ وهذا ضروريٌّ للغسيل والتنظيف؛ لأنّ التوتّر السطحيّ الكبير للماء النقي يمنعه من التغلغل بسهولةٍ بين خيوط المادة والشقوق الصغيرة. يؤدي التوتّر السطحيّ دورًا في ظاهرةٍ أخرى مهمّة، وهي الخاصيّة الشعريّة. إنّها مشاهدةٌ عامة، حيث يرتفع الماء في وعاءٍ زجاجيٍّ قليلًا يلامس الزجاج، (الشكل 10-38أ). يقال إنّ الماء "يرطّب" الزجاج. وفي المقابل، ينخفض الزئبق عند نقطة تلامسه مع الزجاج، (الشكل 10-38ب)، الزئبق لا يرطب الزجاج. هل يرطب السائل السطح الصُّلب؟ الحلّ هو أنّ هذا يعتمد على قوّة ترابط جزيئات الوعاء. ويعود الترابط إلى جزيئات السائل مع جزيئات الوعاء. إنّ الترابط يعود إلى جزيئات من النوع نفسه، أمّا الالتصاق، فيعود إلى القوّة بين جزيئاتٍ من نوعين مختلفين. الماء يرطّب الزجاج؛ لأنّ قوّة التصاق جزيئات الماء مع الزجاج أكبر من قوّة ترابط جزيئات الماء ببعضها. والعكس صحيحٌ بالنسبة للزئبق؛ لأنّ قوى الترابط أقوى من قوّة الالتصاق.

الشكل 10-38 الماء (أ) "يرطب" سطح الزجاج، ولكن (ب) الزئبق لا "يرطب" الزجاج.



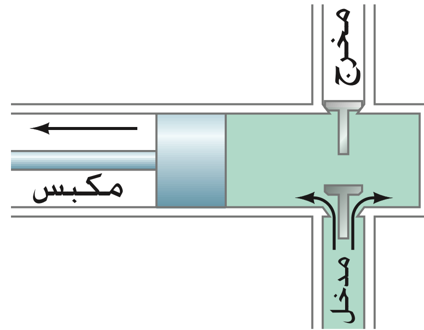
في الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة جدًّا، يُلاحظ أنّ السوائل قد ترتفع أو تنخفض بالنسبة إلى مستوى السائل المحيط. تُسَمَّى هذه **الظاهرةُ "الخاصيةَ الشعرية"**، وهذه الأنابيب الدقيقة تُسَمّى **الأنابيبَ الشعرية**. هل سيرتفع السائل أم سينخفض؟
(الشكل 10-39) يعتمد هذا على النسبة بين قوّتي الترابط والالتصاق. وهكذا يرتفع الماء في أنبوبٍ زجاجيٍّ، في حين ينخفض الزئبق. إنّ المقدار الفعليّ للارتفاع (أو الانخفاض) يعتمد على التوتّر السطحيّ الذي يقي سطح السائل من التمزّق.



الشكل 10-39 الخاصية الشعرية

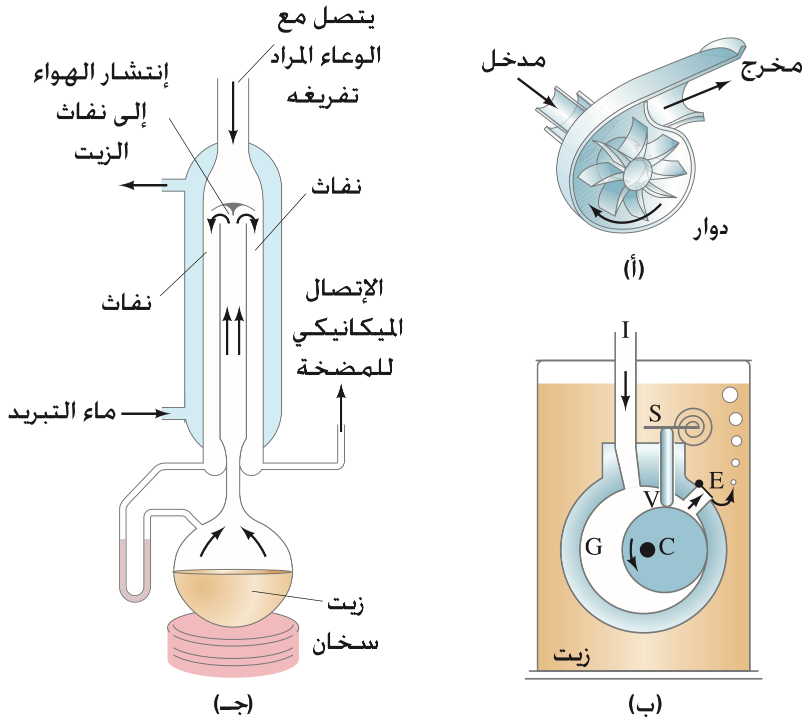
* 10-14 المضخات، والقلب

نختم هذا الفصل بمناقشةٍ مختصرةٍ للمضخّات بأنواعها المختلفة، بما في ذلك القلب. يمكن تصنيف المضخّات تبعًا لوظيفتها. إنّ "مضخة التفريغ" مصمّمةٌ بحيث تعمل على تقليل ضغط الهواء في وعاءٍ معيّن. أمّا المضخّة الكابسة بالمقابل فهي تعمل على زيادة الضغط، كرفع سائل (كالماء من بئر)، أو دفع مائع في أنبوب. ويوضح (الشكل 10-40) المبدأ وراء عمل مضخّة "عاكسة" بسيطة. يمكن أن تكون مضخّة بحيث يتصل المدخل بالوعاء المراد تفريغه. تُستخدم ميكانيكيّةٌ مماثلةٌ في بعض المضخّات الكابسة، في هذه الحالة، يدفع السائل تحت زيادة الضغط إلى المخرج.

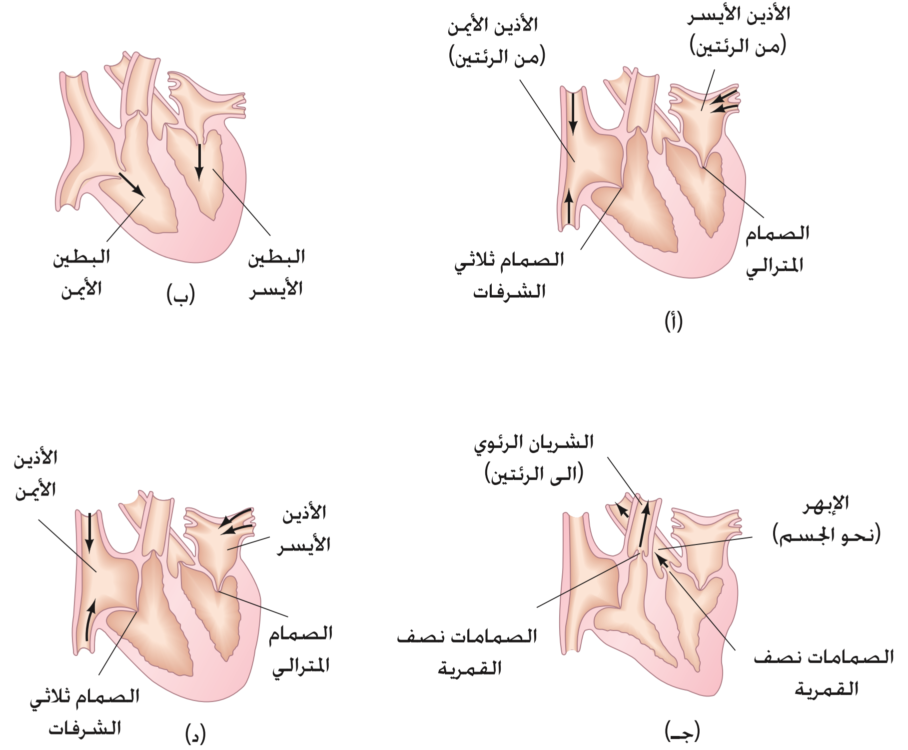


الشكل 10-40 نوع من المضخات: يفتح صمام المدخل والهواء (أو المائع المراد ضخه)، يملأ الحيز الفارغ عندما يتحرك المكبس نحو اليسار. وعندما يتحرك المكبس نحو اليمين (ليس مبينا هنا) يفتح صمام المخرج ويدفع المائع إلى الخارج.

أنواعٌ أخرى من المضخّات مبيّنة في (الشكل 10-41). ويمكن استعمالُ مضخّة الطرد المركزي، أو أيّ مضخّة قوّة، مضخّةً دوارةً؛ أي لإدارة سائل حول مسار مغلق ، مثل ماء التبريد أو زيت التشحيم في السيارة.



الشكل 10-41. أ مضخة الطرد المركزي. تدفع النصول الدوارة المائع عبر أنبوب الخروج. يستخدم هذا النوع من المضخات في المكانس الفراغية، أو مضخة الماء في السيارة (ب) تستعمل مضخة الزيت المحصور للحصول على تفريغ بحدود 10^{-4} mm-Hg : الغاز (عادة الهواء) من الوعاء المراد تفريغه ينتشر إلى الحيز G عبر أنبوب الأخذ؛ الأسطوانة الدوارة غير المركزة C تحصر الغاز الذي في G وتحمله لتدفعه عبر صمام العدم E، وخلال هذا vالمنزلق V في حالة تماس مع C بواسطة الزنبرك S، وهذا يمنع الغاز من العودة إلى G. (جـ) تستخدم مضخة الانتشار للوصول إلى تفريغ يصل إلى 10^{-8} mm-Hg: جزيئات الهواء من الوعاء المراد تفريغه تنتشر إلى النفاث؛ حيث يجرّ دفقا من الزيت المندفع بسرعة الجزيئاتِ بعيدا. نحتاج عادة إلى "مضخة قبل مضخة الانتشار"، وتكون عادة مضخة ميكانيكية (دوارة) (ب)؛ وتعمل كمرحلة أولى في تقليل الضغط.



الشكل 10-42 (أ) في طور (مرحلة) الانبساط، يرتخي القلب بين الضربات. يتحرك الدم إلى القلب ويمتلىء الأذينان بسرعة. (ب) وعند انقباض الأذين، يبدأ طور الانقباض أو الضّخ. يدفع الانقباض الدم عبر الصمّام التاجيّ وثلاثيّ الأطراف إلى البطينين. (جـ) يدفع انقباض البطينين الدم خلال الصمّام الهلالي إلى الشريان الرئوي، الذي يصل بدوره إلى الرئتين والأورطي (أكبر شريان في الجسم)، الذي يصل إلى الشرايين التي تخدم الجسم كلّه. (د) وعند انبساط القلب، تغلق الصمّامات الهلاليّة، ثمّ يملأ الدم الأذينين لتبدأ الدورة من جديد.

تطبيق الفيزياء

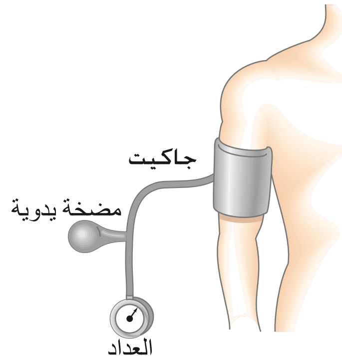
القلب كمضخة

إنّ قلب الإنسان (والحيوانات الأخرى كذلك) هو في الأساس مضخّةٌ دوّارة. عمل قلب الإنسان مبين في (الشكل 10-42). وهناك في الواقع، ممرّان منفصلان لجريان الدّم: المجرى الأطول ينقل الدّم إلى أجزاء الجسم، عبر الشرايين: ليجلب الأكسجين إلى أنسجة الجسم وليأخذ ثاني أكسيد الكربون، ومن ثَمَّ يعيده إلى القلب بواسطة الأوردة، ثم يضخّ هذا الدم إلى الرئتين (الممرّ الثاني): حيث يطلق ثاني أكسيد الكربون ويأخذ الأكسجين. ثم يُعاد الدّم المحمل بالأكسجين إلى القلب، ليُضخّ ثانيةً إلى أنسجة الجسم.

تطبيق الفيزياء

ضغط الدم

يقاس ضغط الدّم باستعمال مانوميتر زئبقي أو أحد الأنواع الأخرى المذكورة سابقًا (البند 10-6)، ويدرّج عادة بـ mm-Hg. يوصل المقياس إلى غلافٍ مملوءٍ بالهواء، ومغلق يُلفّ حول الذراع العلويّ في مستوى القلب، (الشكل 10-43). تُقاس قيمتان لضغط الدّم هما: 1- الضغط الانقباضيّ وهو الضغط الأقصى عندما يضخّ القلبُ الدّمَ. 2- الضغط الانبساطيّ الذي يكون فيه القلب في حالة استرخاء. في البداية، يُزاد الضغط داخل الغلاف فوق الضغط الانقباضي بواسطة مضخّة يدويّة، وهذا يضغط الشريان الرئيس في الذراع، ويُقطع جريان الدّم لفترةٍ وجيزة. ثمّ يُخفّف ضغط الهواء تدريجيًا حتى يبدأ الدّم ثانيةً بالجريان عبر الذراع، ويُكشف عن ذلك بواسطة سماعة* حتى سماع النبضات المعتادة للدّم الذي يتدفّق نحو أسفل الذراع. في هذه اللحظة، يساوي الضغطُ الانقباضيّ ضغطَ الهواء في الغلاف، الذي يقرأ من التدريج. ثم يستمرّ تخفيض الضغط في الغلاف، ويختفي صوت النبضات عندما يدخل الدّم إلى الشريان. عندها يشير المقياس إلى الضغط الانبساطي. الضغط الانقباضي حوالي 120 mm-Hg، أمّا الضغط الانبساطي والطبيعي فهو 80 mm-Hg تقريبا.



الشكل 10-43 جهاز لقياس ضغط الدم.

* عندما يبدأ الدم بالجريان عبر الاختناق (التضيق) الناتج من الغلاف المضغوط، تكون سرعته عالية والجريان اضطرابيا: إنه الاضطراب الذي يسبب صوت النبضات.

ملخص

الحالات الثلاث للمادة هي: **الصلبة**، و**السائلة**، و**الغازية**. تُسَمَّى السوائل والغازات مجتمعة الموائع، وتعني أنّ لها القدرة على الجريان. تعرف **كثافة** المادة بكتلتها لكلّ وحدة حجم:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \textbf{(1-10)}$$

الجاذبيّة النوعيّة هي نسبة كثافة المادة إلى كثافة الماء (عند 4°C). الضغط يعرف بالقوّة لكلّ وحدة مساحة

$$P = \frac{F}{A} \quad \textbf{(2-10)}$$

الضغط عند عمق h في سائلٍ كثافته ثابتةٌ يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$P = \rho g h \qquad \textbf{(3-10 أ)}$$

حيث g هو التسارع الناتج من الجاذبيّة الأرضيّة. ينصّ **مبدأ باسكال** على أنّ الضغط الخارجيّ المؤثّر في مائع محصور ينتقل خلال المائع. يُقاس الضغط بالمانوميتر الزئبقي أو أيّ مقياس آخر. يُستعمل **البارومتير** لقياس **الضغط الجوّيّ**. الضغط الجوّيّ المعياري (عند سطح البحر) يساوي $1.013 \times 10^5\ N/m^2$. الضغط المُقيس هو الضغط الكلّيّ مطروحًا منه **الضغط الجوّيّ**.

ينصّ **مبدأ أرخميدس** على أنّ الجسم المغمور كليًّا أو جزئيًّا في مائعٍ يُدفع إلى الأعلى بقوّة تساوي وزن المائع المُزاح. $(F_B = m_F g = \rho_F V_{displ}\, g)$ يُوصف جريان المائع إمّا بالانسيابيّ؛ حيث تتحرّك طبقات المائع بسلاسةٍ وبانتظامٍ في مساراتٍ تُعرف بخطوط الجريان، أو **بالاضطرابيّ**؛ حيث الجريان ليس منتظمًا، بل دوامات اضطرابية.

معدّل جريان المائع هو كتلة المائع أو حجمه الذي يعبر نقطةً ما لكلّ وحدة زمن.

تنصّ **معادلة الاستمراريّة** على أنه في المائع غير القابل للانضغاط ويجري في أنبوب، فإنّ حاصل ضرب السرعة ومساحة المقطع تبقى ثابتة:

$$A\,v = \text{ثابت} \qquad \textbf{(4-10)}$$

يخبرنا مبدأ برنولي أنه حيث تكون السرعة للمائع عالية، يكون الضغط منخفضًا، وحيث تكون السرعة منخفضةً يكون الضغط عاليًا. للجريان الانسيابي في مائعٍ غير انضغاطيٍّ وعديم اللزوجة، فإنّ **معادلة برنولي** المستندة إلى قانون حفظ الطاقة، هي:

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \qquad \textbf{(5-10)}$$

لنقطتين في مسار الجريان.

[* تعود **اللزوجة** إلى الاحتكاك ضمن المائع، وهي بصورة أساسيّةٍ قوّة احتكاك بين طبقات متجاورة من المائع عندما تنزلق إحداها على الأخرى].

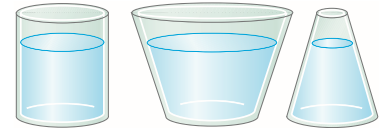
[* تكون سطوح السوائل متماسكة كما لو أنّها تخضع لتوتّر **(التوتّر السّطحيّ)** يسمح بتشكيل القطرات وأجسامٍ، مثل الإبرة الفولاذيّة والحشرات؛ لتقف على سطح السائل].

أسئلــــة

1. إذا كانت كثافة مادّةٍ ما أكبر من كثافة مادةٍ أخرى، فهل يجب أن تكون جزيئات الأولى أثقل من جزيئات الثانية؟ فسّر ذلك.

2. يلاحظ المسافرون بالطائرات أحيانًا أنّ قوارير موادّ التجميل وغيرها تنسكب محتوياتها في أثناء الطيران. ما سبب ذلك؟

3. الأوعية الثلاثة المبيّنة في (الشكل 10-44) مملوءةٌ بالماء إلى الارتفاع نفسه، ولها مساحة القاعدة ذاتها. لذا، فإنّ ضغط الماء والقوّة الكليّة على القاعدة تكون متساويةً، علمًا بأنّ وزن الماء فيها ليس متساويًا. فسّر هذه "المعضلة الهيدروستاتيكيّة".



الشكل 10-44 (السؤال 3)

4. إذا ضغطت دبّوسًا ورأس قلمٍ غير حادٍّ على جلدك بالقوّة نفسها. فما الذي سيجرح جلدك؛ القوّة المؤثرة أم الضغط؟

5. وضعت كميّةٌ قليلةٌ من الماء في علبة جالون معدنيّة. رفعت العلبة عن النار ووُضع عليها الغطاء. بعد ذلك بقليل، تنهار العلبة مطويّةً على بعضها. فسّر ذلك.

6. عند قياس ضغط الدم ، لماذا يجب وضع الغلاف على مستوى القلب؟

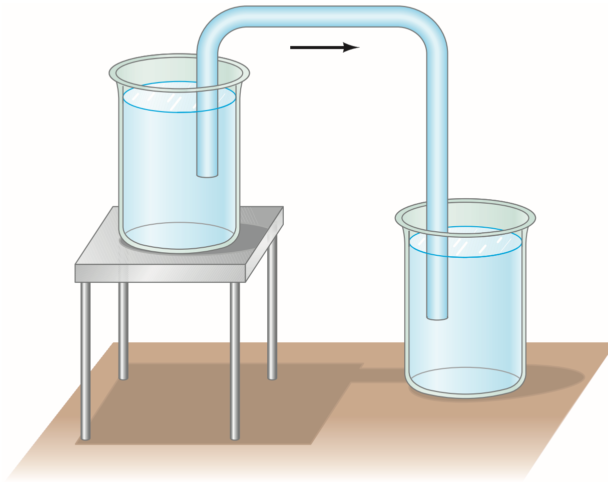
7. مكعبٌ من الجليد يطفو على سطح كأسٍ من الماء مملوءةً حتى حافتها. ماذا يمكنك القول عن كثافة الجليد؟ عندما ينصهر الجليد، هل سينسكب الماء خارجًا؟ فسّر ذلك.

8. هل سيطفو مكعبٌ من الجليد على سطح كأسٍ من الكحول؟ فسّر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

9. إذا وضعت علبة مشروبٍ **غازيٍّ (كولا)** في الماء، فإنّها ستنغمر، ولكن علبة (دايت كولا) سوف تطفو (حاول ذلك!) اشرح السبب .

10. لماذا لا تغرق السفن المصنوعة من الحديد؟

11. فسّر كيف يمكن للأنبوب (الشكل 10-45)، المعروف بـ (سيفون) أن ينقل السائل من وعاء إلى آخر رغم أنّ على السائل الارتفاع في جزءٍ من رحلته. (لاحظ أنّ الأنبوب يجب أن يكون مملوءًا بالسائل في البداية).



الشكل 10-45 (السؤال 11). السّيفون.

12. مركبٌ معبأٌ بالرمل بارتفاع زائد يقترب من جسرٍ منخفضٍ على نهر بحيث لا يستطيع المرور تحته. هل نزيل كمية من الرمل، أم نضيف إلى حمولة المركب؟ [مساعدة: استعمل مبدأ أرخميدس].

13. هل سيكون لبالون فارغ الوزن الظاهريّ نفسه على ميزانٍ مثل وزن بالون مملوءٍ بالهواء؟ علّل.

14. فسّر السبب في ملء بالونات الهيليوم المستخدمة في قياس الظروف الجويّة على ارتفاعاتٍ عاليةٍ عادةً إلى 10%-20% من حجمها الأقصى.

.15 قاربٌ خشبيٌّ صغيرٌ يطفو في بركة سباحة، تمّ وضع علامةٍ تشير إلى مستوى الماء عند حافّة البركة. خذ الأوضاع التالية وفسّر هل سيرتفع مستوى الماء، أم سينخفض، أم أنّه يبقى ثابتًا: (أ) أُزيل القارب من الماء. (ب) أُخذت من القارب مرساةٌ حديديّةٌ ووُضعت على الشاطىء. (ج) أُخذت المرساة من القارب وأُلقيت في الماء.

.16 لماذا تطفو على نحوٍ أعلى في ماءٍ مالحٍ مقارنةً مع ماءٍ عادي؟

.17 إذا دَلّيت قطعتين من الورق عموديًّا وعلى بعد بضعة إنشات(الشكل 10-46) ونفخت بينهما، فكيف - حسب اعتقادك- ستتحرّك الورقتان؟ حاول ذلك وفسّر.



الشكل 10-46
(السؤال 17).

.18 لماذا ينتفخ غطاء الشاحنة نحو الخارج إذا كانت تسير بسرعةٍ كبيرة؟
[تنويه، واقية الرياح تحرف الهواء نحو الأعلى وتدفع خطوط الجريان أقرب لبعضها].

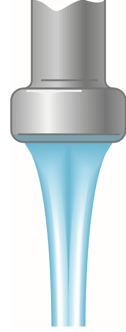
.19 تُقذف السقوف الخشبيَّةُ للمنازل بعيدًا خلال الأعاصير. فسّر ذلك باستعمال مبدأ برنولي.

.20 يُنصح الأطفال بتجنّب الوقوف قريبًا من قطارٍ يتحرّك بسرعةٍ، لأنّهم قد يُسحبون لأسفل القطار. هل هذا ممكن؟ فسّر.

.21 كوبٌ طويلٌ من ستيروفوم مليءٌ بالماء. فُتح ثقبانِ قرب قاعدة الكوب وبدأ الماء بالاندفاع إلى الخارج. إذا أُسقط الكوب سقوطًا حرًّا، فهل سيستمرّ الماء بالتدفق من الثقبين؟ فسّر.

.22 لماذا تقلع الطائرات عادةً في الهواء؟

.23 لماذا يصبح تيّار الماء من الصنبور ضيّقًا كلّما نزل إلى الأسفل (الشكل 10-47)؟



الشكل 10-47
(السؤال 23 والمسألة 82).
الماء ينزل من الصنبور.

.24 إذا تحرّكت سفينتان في مسارين متوازيين، وقريبتين من بعضهما بعضًا، فإنّ خطر اصطدامهما وارد. لماذا؟

مسائــل

2-10 الكثافة والثقل النوعي

.1 (I) إذا كان حجم حجرٍ ضخمٍ من الجرانيت $10^8 m^3$(الشكل 10-48) تقريبًا، فما كتلته بالتقريب؟



الشكل 10-48 المسألة 1.

.2 (I) ما الكتلة التقريبيّة للهواء في غرفة المعيشة $4.8\ m \times 3.8\ m \times 2.8\ m$؟

.3 (I) إذا حاولت تهريب سبائك من الذهب، بأن تملأ حقيبة الظهر، التي أبعادها $60\ cm \times 28\ cm \times 18\ cm$ فكم ستكون كتلتها؟

.4 (I) ضع كتلتك وحاول تخمين حجمك. [تنويه: بما أنّك تستطيع السباحة على سطح الماء مباشرة أو تحته في بركة السباحة، فإنّ لديك فكرةً جيّدةً عن كثافة جسمك].

.5(II) زجاجةٌ كتلتها 35.00 g فارغةٌ و 98.44 g عندما تُملأ بالماء. وعند ملئها بسائل آخر تصبح كتلتها 88.78 g. فما الثقل النوعيُّ لهذا السائل الآخر؟

.6 (II) إذا أُضيفت 5 لتراتٍ من محلولٍ مانع التجمّد (الثقل النوعيُّ = 0.80) إلى 4 لتراتٍ من الماء لعمل 9.0 L من المزيج، فما الثقل النوعيُّ للمزيج؟

3-10 إلى 6-10. الضغط، قاعدة باسكال

.7 (I) خمّن الضغط المؤثّر في الأرض من: (أ) رجل كرسيٍّ مدبّبـةٌ واحدة إذا كانت كتلة الكرسي (60 kg) على أربعة أرجل ومساحتها $0.020\ cm^2$. (ب) فيلٌ كتلته 1500-kg يقف على رِجْلٍ واحدة (مساحتها $800\ cm^2$).

.8 (I) ما الفرق في ضغط الدّم (mm-Hg) بين أعلى الرأس وأخمص القدم لرجلٍ طوله 1.60-m يقف رأسيًّا؟

.9 (I) (أ) احسب القوّة الكليّة للجوّ التي تؤثّر في سطح طاولةٍ أبعادها $1.60 \times 2.9\ m$. (ب) ما القوّة الكليّة التي تؤثّر من الأسفل في السطح الكلّيّ للطاولة؟

.10 (II) في السينما، يخدع طرزان ملاحقيه بالاختباء تحت سطح الماء لعدّة دقائق، في حين يتنفّس بواسطة قشّةٍ طويلةٍ رفيعة. افرض أقصى فرقٍ في الضغط تستطيع رئتاه تحمّله وما تزال تتنفّس هو 85mm-Hg-، احسب أعمق مستوًى يستطيع الوصول إليه.

.11 (II) الضغط المُقيس في كلّ دولابٍ من دواليب السيارة الأربعة هو 240 kPa. إذا كان كلّ دولابٍ يترك أثرًا مساحته $220\ cm^2$، فخمّن كتلة السيارة.

.12 (II) أكبر ضغطٍ مَقيسٍ في رافعةٍ هيدروليكيّة 17.0 atm. ما أكبر كتلة سيارة يستطيع رفعها إذا كان قطر عمود الرفع 28.0 cm؟

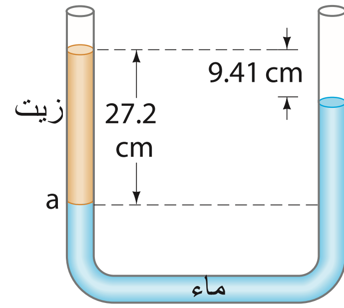
.13 (II) ما ارتفاع مستوى السائل في بارومتر كحوليٍّ عند ضغطٍ جوّيٍّ عياري؟

.14 (II) (أ) ما القوّة الكليّة والضغط المطلق على قاعدة بركة سباحة أبعادها 22.0 m، 8.5 m وعمقها 2.0 m؟ (ب) ماذا سيكون الضغط على جانب البركة قرب قعرها؟

15. (II) ماذا سيكون ارتفاع الغلاف الجوّيّ الأرضيّ لو كانت كثافته منتظمةً وتساوي نصف قيمتها الحاليّة عند سطح البحر؟

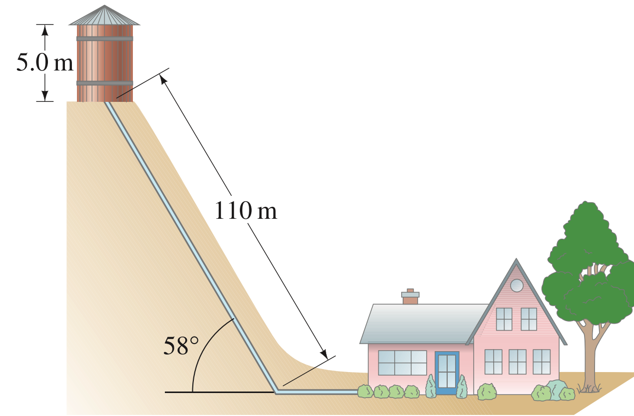
16. (II) صُبَّ ماءٌ ثمّ زيت (لا يمتزجان) في أنبوبٍ بشكل حرف U مفتوحٌ عند النهايتين، فاتزنا كما في (الشكل 10-49). فما كثافة الزيت؟

[تنويه: الضغطان عند النقطتين أ ، ب متساويان، لماذا؟].



الشكل 10-49
(المسألة 16)

17. (II) بيتٌ عند أسفل جبلٍ يُزوّد بالماء من خزّانٍ مملوء، ارتفاعه 5.0 m، ويتصل بالبيت بواسطة أنبوبٍ طوله 110 m ويميل بزاوية 58° مع الأفق (الشكل 10-50). (أ) حدّد ضغط الماء المَقيس عند البيت. (ب) إلى أيّ ارتفاعٍ سوف يصل الماء إذا انطلق رأسيًّا من كسر في الأنبوب أمام البيت؟

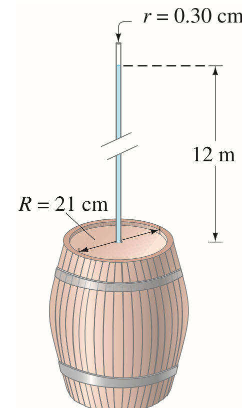


الشكل 10-50 (المسألة 17).

18. (II) احسب أقلّ ضغطٍ مَقيس يلزم في أنبوب ماءٍ يصل إلى بنايةٍ إذا كان الماء سيصل إلى الصنبور في الطابق الثاني عشر على ارتفاع 38m فوق الأنبوب.

19. (II) مانوميتر زئبقي مفتوح الطرف يستعمل لقياس الضغط في خزّان أكسجين. عندما يكون الضغط الجوّيُّ 1040 m bar، ماذا يكون الضغط المطلق (بـ Pa) في الخزّان إذا كان ارتفاع الزئبق في الأنبوب المفتوح (أ) 28.0 cm أعلى (ب) 4.2 cm أقلّ، من الزئبق في الأنبوب الموصول بالخزّان؟

20. (II) في أثناء استنتاج قاعدته،بيّن باسكال كيف يتمّ ضرب القوّة في ضغط المائع. وضع أنبوبًا طويلًا نحيفًا نصف قطره r=0.3 cm عموديًّا في برميل عصير عنب نصف قطره R=21 cm، (الشكل10-51)، فوجد أنّه عندما يتمّ ملء البرميل بالماء، ويملأ الأنبوب إلى ارتفاع 12 m، فإنّ البرميل ينفجر. احسب:
(أ) كتلة الماء في الأنبوب.
(ب) القوّة المحصّلة الناتجة من الماء في البرميل على الغطاء قُبيل أن يتقطع.



الشكل 10-51
(المسألة 20).

***21.** (III) خمّن كثافة الماء على عمق 6.0 km في البحر (انظر الجدول 9-1 البند 9-5 المتعلق بـ"المعامل الجرمي"). بأيّ نسبةٍ تختلف عن الكثافة عند السطح؟

10-7 الطفو وقاعدة أرخميس

22. (I) وجد جيولوجيٌّ أنّ صخرة قمرية كتلتها 9.28 kg لها كتلةٌ ظاهريّة 6.18 kg عندما تُغمر في الماء. ما كثافة الصخرة؟

23. (I) ما نسبة ما ينغمر من قطعة ألمنيوم ستنغمر عند وضعها لتطفو في الزئبق؟

24. (II) رافعةٌ ترفع القشرة الفولاذيّة لسفينة وكتلتها 18,000-kg من الماء. احسب كلًّا من: (أ) الشدّ في كيبل الرافعة عندما تكون القشرة في الماء. (ب) الشدّ عندما تكون القشرة خارج الماء بصورةٍ كاملة.

25. (II) بالونٌ كرويٌّ، نصف قطره 7.35 m مليءٌ بالهيليوم. كم كتلة الحمولة التي يستطيع البالون رفعها، بفرض أنّ كتلة البالون 930 kg؟ اهمل قوّة الطفوّ على جسم الحمولة.

26. (II) شخصٌ كتلته 78-kg، وكتلته الظاهريّة 54 kg (بسبب الطفو) عند وقوفه في الماء الذي يصل إلى وركيه. خمّن كتلة كلٍّ من ساقيه. افرض أنّ الجسم له SG=1.00.

27. (II) ما الهُوية المحتملة لفلز إذا كانت الكتلة الظاهريّة لعيّنةٍ منه 63.5g في الهواء، وكتلة ظاهريّة في الماء 55.4g؟ (انظر الجدول 10-1)

28. (II) احسب الكتلة الحقيقية (في الفراغ) لقطعة من الألمنيوم كتلتها الظاهرية في الهواء 2.0000 kg .

29. (II) حجرة أبحاث تحت سطح البحر كرويّة الشكل، قطرها الخارجيُّ 5.20 m . كتلة الحجرة وهي مملوءة 74,400 kg وتتدلّى إلى قعر البحر بواسطة كيبل. احسب:(أ) قوّة الطفو على الحجرة. (ب) الشدّ في الكيبل.

30. (II) غطّاسٌ يزيح 65.0 L وكتلته الكليّة 68.0 kg. (أ) ما قوّة الطفوّ على الغطّاس في ماء البحر؟ (ب) هل سينغمر الغطّاس أم يطفو؟

31. (II) لا يُستعمل مبدأ أرخميدس فقط لحساب الثقل النوعيّ لصلب باستعمال سائلٍ معروفٍ (مثال 10-8)، بل يمكن عمل العكس أيضًا. (أ) كمثال، كرة ألمنيوم كتلتها 3.4.0 kg لها كتلةٌ ظاهريّة 2.10 kg عند غمرها في سائلٍ معيّن: احسب كثافة السائل. (ب) اشتق صيغةً لحساب كثافة سائلٍ باستعمال هذه الطريقة.

32. (II) تطفو قطعةٌ من الخشب كتلتها 0.48 kg في الماء، ولكنّها تنغمر في الكحول (SG=0.79)؛ حيث كتلتها الظاهريّة فيه 0.047 kg. احسب SG للخشب.

33. (II) الثقل النوعيّ للجليد 0.917، ولماء البحر 1.025. ما نسبة الجزء الظاهر فوق سطح البحر لجبلٍ من الجليد؟

34. (II) تطفو قطعةٌ من الخشب كتلتها 5.25 kg (SG=0.5) في الماء. ما أقلّ كتلةٍ من الرصاص تعلّق بالخشب بواسطة خيطٍ لتجعلها تنغمر؟

10-8 إلى 10-10 جريان المائع؛ معادلة برنولي.

35. (I) باستعمال البيانات في (المثال 10-11)، احسب السرعة المتوسّطة لجريان الدّم في الشرايين الرئيسة في الجسم، مساحتها الكلية 2.0 cm^2.

36. (I) أنبوب شفط هواء نصف قطره 15-cm يُستعمل لتجديد الهواء في غرفةٍ أبعادها 9.2 m × 5.0 m × 4.5 m كلّ 16 دقيقةً. ما سرعة الهواء في الأنبوب؟

.37 (I) بيّن أنّ معادلة برنولي تؤول إلى المعادلة الهيدروستاتيكيّة لتغيّر الضغط مع العمق (معادلة 10-3 ب) عندما لا يكون هناك جريان $(v_1 = v_2 = 0)$.

.38 (I) ما سرعة اندفاع الماء من ثقبٍ عند قاعدة خزانٍ واسعٍ جدًّا وعمقه 4.6 m مملوءٌ بالماء؟ (أهمل اللزوجة).

.39 (II) خرطوم مياه قطره الداخلي $\frac{5}{8}$-inch، يستعمل لتعبئة بركةٍ دائريةٍ قطرها 6.1 m. إذا كانت سرعة انطلاق الماء من الخرطوم 0.40 m/s، فما الزمن اللازم لتعبئة البركة حتى عمق 1.2 m؟

.40 (II) ما الضغط المقيس في مصدر تزويد الماء الضروريّ لكي يضخّ خرطوم الإطفائيّة الماء إلى ارتفاع 15 m؟

.41 (II) أنبوب ماء أفقيٌّ قطره 6.0-cm يضيق القطر تدريجيًّا إلى 4.0 cm. عندما يجري الماء عبر هذا الأنبوب، يكون الضغط المَقيس عند نهايتيه 32.0 kPa و 24.0 kPa على الترتيب، ما معدّل الجريان الحجميّ للماء؟

.42 (II) ما معدّل الجريان الحجميّ للماء من صنبور قطره 1.85 - cm إذا كان الفرق في الارتفاع 15.0 m؟

.43 (II) إذا كانت الرياح تهبّ فوق بيتٍ بسرعة 35 m/s، فما القوّة المحصّلة على السقف إذا كانت مساحته $240\ m^2$ وهو مستوٍ؟

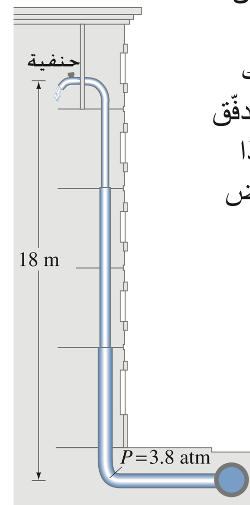
.44 (II) ما قوّة الرفع (بالنيوتن) بسبب مبدأ برنولي على جناح طائرة مساحته $78\ m^2$ إذا كان الهواء يهبّ فوق الجناح وتحته بسرعة 260 m/s و 150 m/s، على الترتيب؟

.45 (II) خمّن ضغط الهواء داخل إعصار من الفئة الخامسة إذا كانت سرعة الرياح 300 km/h. (الشكل 52-10).



الشكل 10-52 (المسألة 45)

.46 (II) يتدفق ماءٌ بضغط مَقيس 3.8 atm في مستوى الشارع إلى بنايةٍ بسرعة 0.60m/s خلال أنبوب قطره 5.0 cm. يضيق الأنبوب إلى 2.6 cm عند الوصول إلى الطابق العلويّ، على ارتفاع 18 m، (الشكل 10-53)حيث تُرك الصنبور مفتوحًا. احسب سرعة تدفّق الماء والضغط المَقيس في مثل هذا الأنبوب عند الطابق العلويّ. افرض عدم وجود تفرعاتٍ في الأنبوب، واهمل اللزوجة.



الشكل 10-53 (المسألة 46)

.47 (III) (أ) بيّن أنّ سرعة الجريان كما يقيسها مقياس فنتوري (انظر الشكل 10-30) تُعطى بالعلاقة

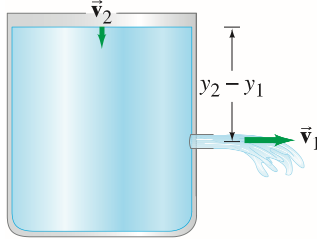
$$v_1 = A_2\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

(ب) أنبوب فنتوري يقيس تدفّق الماء. قطره 3.0 cm، يقلّ إلى حنجرة قطرها 1.0 cm. إذا كان الفرق في الضغط 18 mm-Hg، فما سرعة الماء؟

.48 (III) في (الشكل 10-54)، خذ بالحسبان سرعة الماء عند السطح العلويّ للخزّان، وبيّن أنّ السرعة للمائع عند خروجه من الفتحة السفلية هي

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{(1 - A_1^2/A_2^2)}}$$

حيث $h = y_2 - y_1$ و A_1 و A_2 هما مساحة الفتحة عند السطح العلويّ والسفليّ على الترتيب. افرض أنّ $A_1 \ll A_2$ بحيث يبقى الجريان انسيابيًّا ومستقرًّا.



الشكل 10-54
(المسألتان 48، و 49)

.49 (III) افرض أنّ الفتحة في الخزّان المبيّن في الشكل 10-54 على ارتفاع h_1 فوق القاعدة، وسطح الماء على ارتفاع h_2 فوق القاعدة أيضًا. ويستند الخزّان إلى أرضٍ مستوية (أ) عند أيّ بُعدٍ أفقيٍّ من قاعدة الخزان سوف يصطدم الماءُ بالأرض؟ (ب) عند أيّ ارتفاع h_1' يمكن عمل فتحةٍ بحيث يسقط الماء في المكان الأول نفسه. (اعتبر $v_2 \approx 0$).

*10-11 اللزوجة.

.50* (II) يتكوّن مقياس اللزوجة من أسطوانتين متحدتين في المحور قطراهما 10.20 cm و10.60 cm. يملأ مائع ما الحيّز بينهما إلى ارتفاع 12.0 cm. الأسطوانة الخارجيّة ثابتة، في حين تدور الداخليّة 62 rev/min تحت تأثير عزم 0.024 m.N. احسب لزوجة ذلك السائل.

*10-12 الجريان في الأنابيب؛ معادلة بوسيلي

.51* (I) يشعر بستاني أنّه استغرق وقتًا طويلًا في ريِّ البستان بخرطومٍ قطره $\frac{3}{8}$-in. بأيّ نسبةٍ سوف ينخفض الزمن اللازم لِريّ البستان إذا استعمل خرطومًا قطره $\frac{5}{8}$-in ؟ افرض عدم تغيّر أيّ شيءٍ آخر.

.52* (II) زيت محركات (افرض SAE 10، جدول 10-3) يمرّ عبر أنبوب قطره 1.80 - mm في محرّك نموذجٍ أوّلي. طول الأنبوب 5.5 cm. ما الفرق في الضغط اللازم لمعدّل جريان 5.6 mL/min؟

.53* (II) ماذا يجب أن يكون فرق الضغط بين طرفي أنبوبٍ طوله 1.9 - km وقطره 29 cm لينقل زيتًا$(\rho = 950\ kg/m^3, \eta = 0.20\ Pa\cdot s)$ بمعدّل $450\ cm^3/s$؟

.54* (II) ما القطر المطلوب لقناة شفط هواء طولها 21.0 - m إذا كان الهواء يتجدّد كلّ 10 min في صالة أبعادها $9.0\ m \times 12.0\ m \times 4.0\ m$؟ افرض أنّ المضخّة تؤثّر بضغط مقيس 0.71×10^{-3} atm.

.55* (II) احسب التغيّر في الضغط لكلّ cm على امتداد الأورطة باستعمال البيانات في (المثال 10-11 والجدول 10-3).

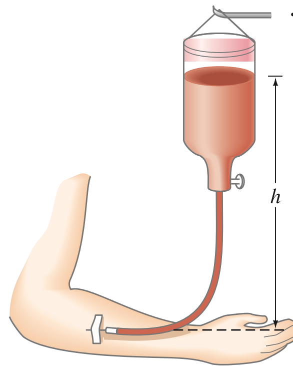
*56. (II) افرض تدرّجًا ثابتًا في الضغط. إذا انخفض جريان الدّم بنسبة 75%، فما نسبة نقص نصف القطر لوعاءٍ دمويٍّ؟

*57. (II) لا تنطبق معادلة بوسيلي إذا كانت سرعة الجريان عاليةً بحيث يبدأ الاضطراب. يبدأ الجريان الاضطرابيُّ عندما يزيد عدد رينولد على 2000، يُعرف **عدد رينولد** Re بـ

$$Re = \frac{2\bar{v}r\rho}{\eta}$$

حيث $\bar{v}$ السرعة المتوسّطة للمائع، ρ كثافة، η معامل اللزوجة، r نصف قطر الأنبوب الذي يجري فيه المائع. (أ) حدّد ما إذا كان جريان الدّم انسيابيًّا أم اضطرابيًّا في الأورطة إذا علمت أنّ السرعة المتوسّطة للدّم في الأورطة ($r = 1.2$ cm) خلال انبساط القلب حوالي 40 cm/s. (ب) تتضاعف سرعة تدفّق الدّم خلال التمرين الرياضي، احسب عدد رينولد في هذه الحالة، واذكر ما إذا كان الجريان انسيابيًّا أم اضطرابيًّا.

58. (III) مريضٌ سيُجرى له نقلٌ للدّم. سوف ينتقل الدّم عبر أنبوبٍ من زجاجةٍ مرفوعةٍ إلى إبرةٍ مغروسةٍ في الوريد (الشكل 10-55). القطر الداخليّ للإبرة 0.40 mm وطولها 4.0 cm، ويُطلب معدّل جريان 4.0 cm^3 من الدّم في الدقيقة. ما ارتفاع الزجاجة h فوق الإبرة؟ احصل على η و ρ من القوائم. افرض أنّ ضغط الدّم 18 torr أعلى من الضغط الجويّ.



الشكل 10-55
(المسألتان 58 و 63)

* 10-13 التوتر السطحي والظاهرة الشعرية

*59. (I) إذا كانت القوّة F اللازمة لتحريك السلك في (الشكل 10-35) هي 5.1×10^{-3} N، فاحسب التوتّر السطحيَّ γ للسائل. افرض $L = 0.070$ m

*60. (I) احسب القوّة اللازمة لتحريك السلك في (الشكل 10-35) إذا غُمر في محلول صابون وطول السلك 18.2 cm.

*61. (II) إذا كان نصف قطر قاعدة رأس حشرة 3.0×10^{-5} m وكتلتها 0.016 g. فهل تتوقّع أنّ الحشرة ذات الأرجل الستّ تبقى على سطح الماء؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

*62. (II) يمكن تحديد التوتّر السطحيّ لسائلٍ بقياس القوّة F المطلوبة فقط لرفع حلقةٍ دائريّةٍ من البلاتين نصف قطرها r من سطح السائل. (أ) جد صيغة لـ γ بدلالة F و r (ب) واحسب γ للسائل المجرب. إذا علمنا أن قيمة $F = 8.40 \times 10^{-3}$ N وقيمة r = 2.8 cm عند درجة حرارة 30°C .

مسائل عامة

63. يتمّ إدخال السوائل إلى الوريد عادةً تحت تأثير الجاذبيّة، كما هو مبيّن في (الشكل 10-55). افرض أنّ كثافة السائل 1.00 g/cm^3. على أيّ ارتفاع h تُوضع الزجاجة ليكون ضغط السائل (أ) 55 mm-Hg؟ (ب) 650 mm-H_2O؟ إذا كان ضغط الدّم 18 mm-Hg فوق الضغط الجوّيّ، فما ارتفاع الزجاجة بحيث يدخل السائل إلى الوريد فقط ؟

64. إذا أثّرت قوّة 2.4-N في مكبس إبرة الحقن تحت الجلد، وكان قطر المكبس 1.3 cm، وقطر الإبرة 0.20 mm فبأيِّ قوّة: (أ) يخرج السائل من الإبرة؟ (ب) تؤثّر في المكبس لدفع السائل في الوريد حيث الضغط المَقيس 18 mm-Hg؟ الحلّ للحظةٍ قُبيل أن يبدأ السائل بالحركة.

65. استعملت مضخّة الدرّاجة لنفخ دولاب. كان الضغط المَقيس الابتدائي للدولاب 210 kPa (30 psi) ، وعند نهاية النفخ أصبح الضغط 310 kPa (45 psi). إذا كان قطر المكبس داخل أسطوانة المضخّة 3.0 cm، فما مدى القوّة التي يجب أن تؤثّر بها في المكبس من البداية حتى النهاية؟

66. خمّن الضغط على الجبال تحت طبقة الجليد في المنطقة الجنوبيّة التي يُقدّر سمكها بـ 3 km.

67. ما الفرق التقريبيُّ في ضغط الهواء الجوّيِّ بين قمّة بناية الإمْبَيَرْ ستيت في نيويورك وقاعدتها؟ طولها 380 m وتقع في مستوى سطح البحر. عبّر عن الحلّ كنسبةٍ من الضغط الجوّيّ عند مستوى سطح البحر.

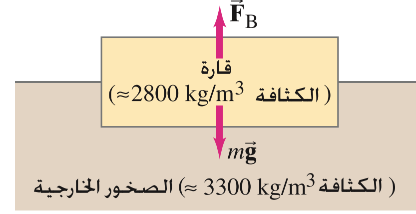
68. استُعملت رافعةٌ هيدروليكيّةٌ لرفع سيّارةٍ كتلتها 970-kg مسافة 12 cm عن الأرض، القوّة المؤثّرة 250 N (أ) ما مساحة مكبس الدخل؟ (ب) ما الشغل المبذول لرفع السيارة 12 cm؟ (ج) إذا تحرّك مكبس الدخل مسافة 13 cm كلّ ضغطة (ضربة)، فكم المسافة التي تتحرّكها السيّارة إلى الأعلى بعد كلّ ضربة؟ (د) كم عدد الضربات المطلوبة لرفع السيارة 12 cm؟ (هـ) بيّن أنّ الطاقة محفوظة.

69. تُعدّ الزرافات هندسةً عجيبةً من القلب والشرايين. احسب الفرق في الضغط (بوحدة الضغط الجوّيّ) الذي تتلاءم معه الأوعية الدمويّة في رأس الزرافة عندما تخفض رأسها من وضع الرأس في أعلى مستوًى ثمّ لمستوى الأرض عندما تخفض رأسها لتشرب. متوسّط ارتفاع الزرافة 6 m.

70. عندما تنخفض بمقـدارٍ كبيـرٍ في أثناء قيادة السيارة، تسمع فرقعةً في أذنيك، وهذا يعني أنّ الضغط خلف طبلة الأذن يساوي الضغط في الخارج. إذا لم يحدث ذلك، فما القوّة التقريبيّة على طبلة الأذن التي مساحتها 0.50 cm^2 إذا تغيّر الارتفاع بـ 950 m؟

71. تحتوي إحدى ذراعي أنبوبٍ بشكل U على ماء، في حين تحتوي الذراع الأخرى على كحول. إذا تقابل السائلان بالضبط عند قعر الأنبوب U وارتفاع الكحول 18.0 cm، فما ارتفاع الماء؟

72. نموذج بسيط (الشكل 10-56) يُعتبر القارة كقطعة (كثافتها $\approx 2800\ kg/m^3$) تطفو في الصخرة الخارجيّة (كثافتها $\approx 3300\ kg/m^3$). افرض أنّ سمك القارة 35 km (متوسط سمك القشرة الأرضيّة). خمّن ارتفاع القارة فوق القشرة المحيطة.



الشكل 10-56 (المسألة 72).

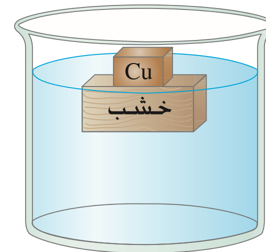
73. انكماش البطين الأيسر من القلب يضخ الدّم إلى الجسم. افرض أنّ مساحة السطح الداخليّ للبطين الأيسر $82\ cm^2$، وأنّ أكبر ضغطٍ في الدّم هو 120 mm-Hg. احسب القوّة التي ينتجها هذا البطين عند أكبر ضغط.

74. احسب، بالتقريب، الكتلة الكليّة للغلاف الجوّيّ الأرضيّ، باستعمال القيمة المعروفة للضغط الجوّيّ عند مستوى سطح البحر.

75. افرض أنّ الشخص يستطيع أن يخفض الضغط في رئتيه إلى 80- mm-Hg ضغط مَقيس. كم ارتفاع الماء الذي يمكن امتصاصه باستعمال الماصّة (القشة)؟

76. تحمل سفينةٌ ماءً إلى جزيرةٍ مقفرةٍ في البحر الكاريبي، مساحة سطحها الأفقيّ $2650\ m^2$ عند خطّ الماء (خط الغطس). وعند تفريغها، ترتفع السفينة 8.50 m في البحر. ما كميَّة الماء التي تمّ توريدها؟

77. وزنٌ من النحاس (Cu) وضع فوق قطعة من الخشب (كثافته $= 0.60 \times 10^3\ kg/m^3$) يطفو في الماء، كما هو مبيّن في (الشكل 10-57). ما كتلة النحاس إذا كان السطح العلويّ لقطعة الخشب في مستوى سطح الماء بالضبط ؟



الشكل 10-57 (المسألة 77)

78. تُصنع طوّافةٌ من 10 جذوعٍ من الخشب مرصوصةً معًا. قطر الجذع 56 cm وطوله 6.1 m. كم شخصًا تستطيع الطوّافة حمله قبل أن تبتّل أقدامهم بالماء، بفرض أنّ الكتلة المتوسّطة للشخص 68 kg؟ لا تهمل وزن الخشب. افرض أنّ الثقل النوعيّ للخشب 0.60.

79. يُضَخُّ في كلّ نبضة قلب $70\ cm^3$ تقريبًا من الدّم من القلب لمتوسّط ضغط 105 mm-Hg. احسب قدرة القلب الناتجة بالواط. بفرض 70 نبضةً في الدقيقة.

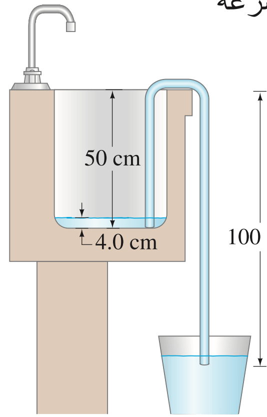
80. يتسارع دلو ماءٍ نحو الأعلى بمعدّل 2.4 g. ما قوَّة الطفوِّ على قطعة غرانيت كتلتها (3.0 kg) SG=2.7 مغمورة في ماء الدلو؟ هل ستطفو القطعة؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالنفي أو الإيجاب.

81. ما مقدار الضغط في الماء إذا كانت ستخرج من صنبورٍ بسرعة 9.5 m/s؟ اهمل اللزوجة.

82. يقلّ قطرُ تيّار الماء من الصنبور كلّما سقط إلى الأسفل (الشكل 10-47). اشتقّ صيغةً للقطر بدلالة في y بعد الماء أسفل الصنبور، علمًا بأنّ سرعة الماء v_0 عند مغادرته للصنبور الذي قطره d.

83. رشّاش ماءٍ لمسطّحٍ عشبيٍّ له أربعة رؤوس، ويُزوّد بالماء من خرطومٍ قطره 1.9 cm. يخرج الماء من الرؤوس بزاوية 35° مع الأفق، ويغطّي نصف قطر 8.0 m. (أ) ما سرعة الماء المندفع من كلّ رأس؟ (افرض أنّ مقاومة الهواء صفر) (ب) إذا كان قطر فتحة كلّ رأس 3 mm، فكم لترًا من الماء تعطي الرؤوس الأربعة في الثانية؟ (جـ) ما سرعة جريان الماء داخل الأنبوب الذي قطره 1.9 cm؟

84. تريد تفريغ الماء من مغسلةٍ مسدودةٍ مساحتها $0.48m^2$ ومملوءةٍ لارتفاع 4.0 cm. يرتفع أنبوب السيفون 50 cm فوق قطر المغسلة ثم ينخفض 100 cm إلى دلوٍ كما هو مبيّن في (الشكل 10-58).قطر أنبوب السيفون 2.0 cm. افرض أنّ الماء يدخل أنبوب السيفون بسرعةٍ تقريبيّةٍ تساوي صفرًا. احسب مايلي: (أ) سرعة الماء عند دخوله إلى الدلو. (ب) الزمن اللازم لتفريغ المغسلة بالتقريب.



الشكل 10-58 (المسألتان 84 و85).

85. افرض أنّ سيفونًا ينقل الماء من وعاءٍ إلى آخرَ (منخفض) كما في (الشكل 10-58). احسب معدّل الجريان إذا كان قطر الأنبوب 1.2 cm والفرق بين مستوى الماء في الوعاءين 64 cm.

86. طائرةٌ كتلتها $2.0 \times 10^6\ kg$. يجري الهواء تحت جناحيها بسرعة 95 m/s. إذا كانت مساحة الجناحين $1200\ m^2$، فما سرعة حركة الهواء فوقهما لتبقى الطائرة في الهواء؟

87. يُوضع دم حيوانٍ في زجاجةٍ على ارتفاع 1.70 m فوق إبرةٍ طولها 3.8 cm، وقطرها الداخلي 0.40 mm، حيث يجري الدم بمعدّل $4.1\ cm^3/min$. ما لزوجة هذا الدم؟

88. إذا كان ترسّب الكولسترول في شريان يغلقه بنسبة 15%، فماذا سيكون الأثر في جريان الدم؟

إجابات التمارين

أ: القيمة نفسها. يعتمد الضغط على العمق وليس على الطول.

ب: أقلّ.

جـ: يزداد.





يعدّ بندول الساعة مثالًا مناسبًا على الحركة الاهتزازيّة. وهناك الكثير من أنواع الحركة الاهتزازيّة تكون على هيئة دالة جيبية مع الزمن، أو أنّها تقريبًا كذلك، وتُدعى الحركة التوافقيّة البسيطة. إنّ الأنظمة الحقيقية، عامّةً، لا تخلو من بعض الاحتكاك، ممّا يجعل الحركة "مضمحلّة". فعندما تؤثّر قوّةٌ خارجيّةٌ جيبيّةٌ في نظامٍ ما قابل للاهتزاز، يحدث الرنين إذا كانت القوّة المحرّكة قريبةً من التردّد الطبيعيّ للاهتزاز أو عنده. إنّ الاهتزازات قد تؤدّي إلى موجات- كموجات الماء أو الموجات المتحرّكة في الوتر- تسير مبتعدة عن مصدرها.

الفصل 11

الاهتزازات والموجات

هناك الكثير من الاجسام تتأرجح أو تتذبذب، ومثال ذلك جسمٌ في نهاية زنبرك، شوكةٌ رنانّةٌ، عجلة التوازن في ساعةٍ قديمة، البندول، مسطرةٌ بلاستيكيّةٌ مثبتة فوق حافة طاولة وتضرب برفق، خيوط القيثار أو البيانو، العناكب تكشف عن فريستها من اهتزازات أجنحتها، السيارة تتأرجح نحو الأعلى والأسفل عند المطبّات، وتهتزّ المباني والجسور عند مرور الشاحنات الثقيلة أو الرياح العاتية. وبسبب أنّ المواد الصلبة غالبًا ما تكون مرنه (انظر البند 9-5)، فإنّها تهتزّ عند إعطائها دفعًا. وفي المذياع والتلفزيون هناك موجاتٌ كهربائيّةٌ. وعلى المستوى الذرّيّ، تهتزّ الذرّات في الجزيئات، وكذلك تهتزُّ الذرّات في المواد الصلبة حول أماكن اتزانها. والحركة الاهتزازيّة مهمةٌ جدًّا لأنّها عامّة في الحياة اليوميّة وتحصل في كثيرٍ من مجالات الفيزياء. وأنّ الموجات الميكانيكية توصف بصورةٍ تامّةٍ على أساس ميكانيكا نيوتن.

إنّ الاهتزازات والحركة الموجية موضوعان متصلان؛ فالموجات- سواءً كانت موجاتٍ في المحيط ، أو موجاتٍ في وتر، أو موجات هزّاتٍ أرضيّة، أو موجاتٍ صوتيّةٍ في الهواء – كلّها لها مصدر هو الاهتزاز. وفي حالة الموجات الصوتية، فإنّ المصدر ليس فقط هو الذي يهتز؛ بل كذلك الكاشف- طبلة الأذن، أو غشاء الميكروفون. وبالفعل، عندما تسير موجةٌ في وسطٍ ما، فإنّ الوسط يهتزّ (مثل الهواء في حالة الموجات الصوتية). في الجزء الثاني من هذا الفصل، وبعد أن نناقش الاهتزازات، سنناقش الموجات البسيطة مثل موجات الماء أو الأوتار. وأما في (الفصل 12)، فسوف ندرس موجات الصوت، وسوف نعالج في فصولٍ لاحقةٍ أشكالًا أخرى من الحركة الموجية متضمّنةً الموجات الكهرومغناطيسيّة والضوء.

11-1 الحركة التوافقية البسيطة

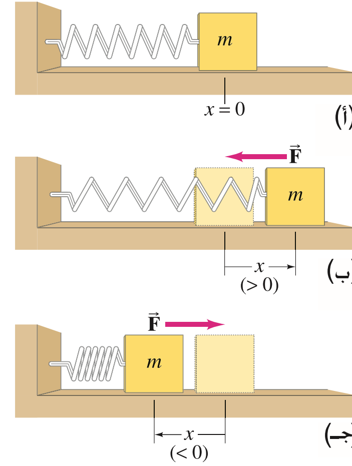
عندما يهتزّ جسمٌ أو يتأرجح نحو الأمام والخلف في المسار نفسه، فإنّ كلّ اهتزازةٍ تستغرق المقدار نفسه من الزمن، وبذلك تكون الحركة دوريّة.

إنّ أبسط شكلٍ من الحركات الدورية تُمَثَّلُ بجسمٍ يتأرجح في نهاية زنبركٍ منتظم. ولأنّ كثيرًا من الأنظمة المهتزّة تشبه هذا النظام، فسنعالجه بالتفصيل. ويمكن إهمال كتلة الزنبرك، وأنّه موضوعٌ أفقيًّا كما في (الشكل 11-1أ) بحيث ينزلق الجسم الذي كتلته m دون احتكاك على السطح الأفقي. لكلّ زنبركٍ طولٌ طبيعيٌّ بحيث لايؤثّر بأيّ قوّةٍ في الكتلة m عند هذا الطول. إذا حركت الكتلة نحو اليسار بحيث تضغط الزنبرك، أو نحو اليمين بحيث يستطيل الزنبرك، عندها سيؤثر الزنبرك بقوّةٍ في الكتلة باتجاهٍ يعمل على إعادة الكتلة إلى **موضع الاتزان**. لذلك، تُسَمّى هذه "قوّة إعادة". وسنعتمد الوضع الشائع بحيث يمكن افتراض أنّ مقدار قوّة الإعادة F يتناسب طرديًّا مع الإزاحة x التي استطالها الزنبرك (الشكل 11-1ب) أو انضغط (الشكل 11-1جـ) عن موضع الاتزان :

موضع الاتزان

$$F = -kx \qquad \text{(قوّة ناجّة من الزنبرك)} \qquad (11\text{-}1)$$

لاحظ أنّنا اخترنا موضع الاتزان عند $x = 0$. (المعادلة 11-1) التي تُسَمّى قانون هوك (انظر البندين 6-4 و9-5)، يُعدّ دقيقًا مادام الزنبرك لم ينضغط أو يستطيل بحيث يتعدّى حدّ المرونة (انظر الشكل 19-9).



الشكل 11-1 كتلة تهتز عند نهاية زنبرك منتظم .

تشير إشارة السالب في (المعادلة 11-1) إلى أنّ قوّة الإعادة تكون دائمًا في الاتجاه المعاكس للإزاحة x. فمثلًا، إذا اخترنا الاتجاه الموجب نحو اليمين في (الشكل 11-1ب) ، فإنّ x تكون موجبةً عندما يستطيل الزنبرك. في حين يكون اتجاه قوّة الإعادة نحو اليسار (الاتجاه السالب). وإذا انضغط الزنبرك، فستكون x سالبة (إلى اليسار) ولكن القوّة ستؤثّر نحو اليمين (الشكل 11-1 جـ).

ثابت المرونة k في (المعادلة 11-1) يُسمّى ثابت الزنبرك أو معامل صلابة الزنبرك F. ولاستطالة الزنبرك مسافة x ؛ علينا أن نؤثّر بقوّة (خارجيّة) على النهاية الحرّة للزنبرك على الأقلّ بمقدار

$$F = +kx \qquad \text{(قوّة خارجيّة على الزنبرك)}$$

وكلّما كانت قيمته k أكبر، زادت القوّة اللازمة لاستطالة الزنبرك مسافةً معيّنة ؛ أي أنّه كلّما كان الزنبرك أصلب، كان ثابت الزنبرك k أكبر.

لاحظ أنّ القوّة F في (المعادلة 11-1) ليست ثابتة، ولكنّها تتغيّر بتغيّر الموضع. لذا، فإنّ تسارع الكتلة m ليس ثابتًا. وعليه، لانستطيع استعمال معادلات الحركة بتسارعٍ ثابتٍ، كما في (الفصل 2).

تنويه:
القوة والتسارع ليسا ثابتين
المعادلات: 11-2 ليست مفيدة هنا .

دعنا نراقب ماذا يحصل عندما ينضغط زنبركنا المنتظم مسافة $x = -A$، كما هو مبيّن في (الشكل 11-2أ)، ثمّ يفلت. يؤثّر الزنبرك بقوّةٍ في الكتلة حيث تُعاد إلى موضع الاتزان. ولكن لأنّ الكتلة تسارعت بسبب القوّة، فإنّها تمرّ من موضع الاتزان بسرعةٍ معقولة. وفي الواقع، حال وصول الكتله إلى موضع الاتزان، فإنّ القوّة المؤثّرة فيها تنقص إلى الصفر، إلا أنّ سرعتها عند هذه النقطة تكون أكبر ما يمكن ، v_{max}، (الشكل 11-2 ب). وعندما تتحرّك الكتله أكثر نحو اليمين، فإنّ القوّة المؤثّرة فيها تحاول إبطاءها، وتتوقّف لحظيًّا عند $x = A$، (الشكل 11-2 جـ). ثم تبدأ بالحركة راجعةً في الاتجاه المعاكس، وتتسارع حتى تمرّ في نقطة الاتزان، (الشكل 11-2 د)، ثم تتباطأ حتى تصل إلى سرعةٍ تساوي صفرًا عند نقطة البداية الأصلية، $x = -A$، (الشكل 11-2 هـ). ثم تكرّر الحركة متحرّكةً نحو الخلف والأمام بصورةٍ متماثلة بين $x = A$ ، و $x = -A$.

تمرين أ: يهتزُ جسمٌ للأمام والخلف. أيٌّ من هذه العبارات تكون صحيحةً عند زمنٍ معيّنٍ خلال الحركة: (أ) يكون للجسم سرعةٌ غير الصفر، وتسارعه في اللحظة نفسها لا يساوي صفرًا. (ب) قد يكون للجسم سرعةٌ، صفر، وكذلك تسارع صفر. (جـ) قد يكون تسارع الجسم صفرًا، ولكن سرعته ليست كذلك. (د) قد لاتكون سرعة الجسم وتسارعه صفرًا.

إذا رغبنا في مناقشة الحركة الاهتزازيّة، فإنّنا بحاجةٍ إلى تعريفٍ يصف التعبيرات؛ فالإزاحة هي المسافةُ x التي تقطعها m من موضع الاتزان عند أيّ لحظة.

إن أقصى **إزاحة** – أكبر مسافة عن موضع الاتزان- تُسَمَّى الاتساع، A. تعود الدورة إلى الحركة ذهابًا وإيابًا بصورةٍ كاملةٍ ابتداءً من نقطةٍ معيّنة، ومثال ذلك من $x = -A$ إلى $x = A$، ثم العودة إلى $x = -A$.

يُعرَّف الزمن الدوري، T، بأنّه الزمن اللازم لعمل دورةٍ كاملة. وأخيرًا، فإن التردّد، f ، هو عدد الدورات الكاملة في الثانية الواحدة. ووحدة التردّد عادة هي Hertz (Hz) حيث (s^{-1}) دورة /s $1\,Hz = 1$

ويمكننا ملاحظة أنّ العلاقة بين التردد والزمن الدوريّ عكسيّة، كما لاحظنا سابقًا (المعادلتان 5-2 و 8-8):

$$f = \frac{1}{T}, T = \frac{1}{f} \tag{2-11}$$

فمثلًا، إذا كان التردّد 5 دوراتٍ في الثانية، فإنّ كلّ دورةٍ تستغرق $\frac{1}{5}$s. وفي الواقع، إنّ اهتزاز زنبركٍ معلّق عموديًّا هو نفسه الاهتزاز للزنبرك الأفقي. وبسبب الجاذبيّة، فإنّ الزنبرك العموديّ بوجود كتلة m عند نهايته سيكون أطول عند الاتزان ممّا لو كان الزنبرك أفقيًّا، كما هو مبيّن في (الشكل11-3). يكون الزنبرك متزنًا عندما $\Sigma F = 0 = mg - kx_0$. لذلك، يمتطّ الزنبرك بمقدارٍ إضافيٍ $x_0 = mg/k$ ليصبح في وضع الاتزان. وإذا قيست x من موضع الاتزان الجديد هذا، فيمكن عندئذٍ استخدام (المعادلة 11-1)مباشرة مع الثابت k نفسه.

$\vec{F}$
$v = 0$
$x = -A$ $x = 0$ (أ)
$\vec{F} = 0$
$v = +v$ (عظمى في الاتجاه الموجب)
$x = 0$ (ب)
$\vec{F}$
$v = 0$
$x = 0$ $x = A$ (جـ)
$\vec{F} = 0$
$v = -v$ (عظمى في الاتجاه السالب)
$x = 0$ (د)
$\vec{F}$
$v = 0$
$x = -A$ $x = 0$ (هـ)

الشكل 11-2 القوة على، والسرعة لكتلة في مواقع مختلفة من دورة الاهتزاز على سطح عديم الاحتكاك.

تنويه:
للزنبرك العمودي، قس الإزاحة x أو y من موضع الاتزان الرأسي الجديد.

$F = -kx_0$
x_0
m
x
x
$m\vec{g}$
(ب) (أ)
تقاس x من هذا الموضع.

الشكل 11-3
(أ)زنبرك حر معلق عموديًا.
(ب)الكتلة m مثبته بالزنبرك في موضع اتزان جديد. ويحصل عندما $\sum F = 0 = mg - kx_0$

المثال 11-1 زنبركات السيارة

عندما تركب عائلة مكوّنة من أربعة أشخاصٍ كتلتهم 200 kg سيارتها التي كتلتها 1200-kg، فإنّ زنبركات السيارة تنضغط 3.0 cm. (أ) ما ثابت الزنبرك لهذه السيارة (الشكل 11-4)، إذا فرضنا أنّها تتصرف كزنبرك واحد؟ (ب) إلى أيّ مدى سوف تنخفض السيارة إذا حملت بـ 300 kg بدلًا من 200 kg؟

النهج: نستعمل قانون هوك. القوّة الفائضة المساوية لوزن الأشخاص mg، تسبب إزاحة 3.0-cm.

الحل: (أ) القوّة المضافة مقدارها $(200\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 1960\,\text{N}$ تسبّبُ انضغاط الزنبركات 3.0×10^{-2} m. لذلك (المعادلة 11-1):

$$k = \frac{F}{x} = \frac{1960\,\text{N}}{3.0\times10^{-2}\,\text{m}} = 6.5\times10^{4}\,\text{N/m}.$$

(ب) إذا حملت السيارة بـ 300 kg، فسيعطينا قانون هوك بأن:

$$x = \frac{F}{k} = \frac{(300\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)}{(6.5\times10^{4}\,\text{N/m})} = 4.5\times10^{-2}\,\text{m},$$

أو 4.5 cm

ملحوظة: يمكننا الحصول على x دون إيجاد قيمة k؛ لأنّ x تتناسب مع F. وإذا كان 200 kg تضغط الزنبرك 3.0 cm، إذن، 1.5 مرّةٍ قدر القوّة سوف تضغط الزنبرك 1.5 مرّةٍ قدر 3.0 cm، أي 4.5 cm.



الشكل 11-4 صورة لزنبرك سيارة، (كذلك نرى ماصّ الصدمة، باللّون الأحمر، انظر البند 11-5).

SHM

SHO

إذا اهتزّ أيّ نظامٍ بحيث تتناسب قوّة الإعادة طرديًّا مع سالب الإزاحة (كما في المعادلة 11-1 ، $F = -kx$) فيُقال عندها إنّ النظام يظهر حركةً توافقيّةً بسيطة (SHM).* ويُقال كذلك إنّ هذا النظام مهتزٌّ توافقيٌّ بسيط (SHO). وقد رأينا في (البند 9-5) أنّ معظم المواد الصلبة تمتدّ أو تنضغط تبعًا (للمعادلة 11-1) ما دامت الإزاحة ليست كبيرة. لذا، فإنّ كثيرًا من الاهتزازات الطبيعيّة تكون توافقيّةً بسيطةً، أو قريبةً جدًّا من ذلك، بحيث يمكن معالجتها تبعًا لنموذج SHM.

المثال المفاهيمي 11-2 هل الحركة توافقية بسيطة؟

أيٌّ مما يلي يمثّل مهتزًّا توافقيًّا بسيطًا (SHO):

(أ) $F = -0.5x^2$ (ب) $F = -2.3y$

(جـ) $F = 8.6x$ (د) $F = -4\theta$

الإجابة: كلّ من (ب) و (د) يمثّل مهتزًّا توافقيًّا بسيطًا لأنّهما يعطيان القوّة بصورة سالب مقدار ثابت مضروبًا في الإزاحة. إنّ الإزاحة ليست بالضرورة x، ولكنّ الإشارة السالبة مطلوبةٌ لإعادة النظام إلى الاتزان، ولهذا السبب أن (جـ) ليست (SHO).

11-2 الطاقة في المهتز التوافقي البسيط

يُعدُّ التعامل مع مبدأ الطاقة ملائمًا ومفيدًا مع القوى المتغيّرة كما في الحركة التوافقيّة البسيطة كما رأينا في الفصل 6. لضغط زنبرك أو استطالته؛ لابدّ من عمل شغلٍ. لذا، فإنّ طاقة الوضع تختزن في الزنبرك المضغوط والممتد. وفي الواقع، فقد رأينا سابقًا في البند 6-4 أن طاقة وضع المرونة تُعطى بـ

$$\text{PE} = \tfrac{1}{2}kx^2$$

والطاقة الميكانيكيّة الكليّة E لنظام الكتلة – الزنبرك تساوي مجموع الطاقتين الحركيّة والوضع.

الطاقة الكلية لـ SHO

$$E = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2, \qquad \text{(11-3)}$$

حيث v سرعة الكتلة m عندما تكون على بعد x من موضع الاتزان. وبما أنّه لايوجد هناك احتكاك، فإنّ الطاقة الميكانيكيّة الكلية E تبقى ثابتة.

* كلمة توافقي تعود إلى أنّ الحركة هي حركة "جيبيّة"، وهذا ماسنناقشه في البند 11-3. وتُعدّ "بسيطة" عندما تكون حركة جيبيّة بتردّد منفرد.

وعندما تتحرّك الكتلة إلى الأمام والخلف، فإنّ الطاقة تتغيّر من طاقة وضع إلى طاقة حركةٍ، ومن ثمّ بالعكس (الشكل 11-5). عند نقطتي النهاية $x = -A$ و $x = A$ (الشكل 11-5أ،جـ) تختزن الطاقة كلّها في الزنبرك بصورة طاقة وضع (وتكون متساوية سواء أكان الزنبرك ممتدًّا أم منضغطًا إلى أقصى اتساع). وعند هاتين النهايتين، تتوقّف الكتلة لحظيًّا عند تغيير اتجاه الحركة، حيث $v = 0$ و

$$E = \tfrac{1}{2}m(0)^2 + \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(4-11 أ)}$$

وبذلك تكون الطاقة الميكانيكيّة الكليّة للمهتزّ البسيط التوافقيّ متناسبةً مع مربّع الاتساع. وعند نقطة الاتزان $x = 0$ (الشكل 11-5ب) تكون الطاقة كلّها حركيّة:

$$E = \tfrac{1}{2}mv_{max}^2 + \tfrac{1}{2}k(0)^2 = \tfrac{1}{2}mv_{max}^2 \qquad \text{(4-11 ب)}$$

حيث تمثّل v_{max} السرعة القصوى خلال الحركة (التي تحدث عند $x = 0$). وأمّا عند النقاط المتوسطة (الشكل 11-5د) فإنّ الطاقة تكون حركيّة ووضعًا. ولأنّ الطاقة محفوظة (نستعمل المعادلتين 11-3 ، 11-4أ)، فنجد:

$$\tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2 = \tfrac{1}{2}kA^2. \qquad \text{(4-11 جـ)}$$

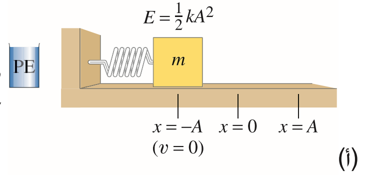
من صيغة الحفظ هذه، يمكن حساب السرعة كدالة في الموقع. ونحلّ لإيجاد v^2:

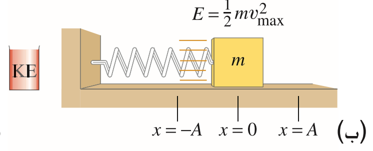
$$v^2 = \frac{k}{m}(A^2 - x^2) = \frac{k}{m}A^2\left(1 - \frac{x^2}{A^2}\right).$$

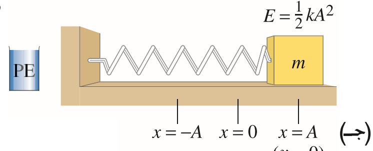
من (المعادلتين 11-4 أ و 11-4 ب)نحصل على $\tfrac{1}{2}mv_{max}^2 = \tfrac{1}{2}kA^2$ وعليه، فإنّ $v_{max}^2 = (k/m)A^2$، ثم نعوض هذه في المعادلة أعلاه ونأخذ الجذر التربيعيّ للطرفين:

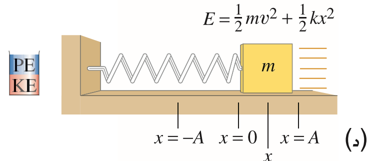
$$v = \pm v_{max}\sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}. \qquad \text{(5-11)}$$

وهذه تعطي سرعة الجسم عند أي موقع x. وبسبب تحرك الجسم إلى الأمام والخلف ، فإنّ سرعته تكون بالاتجاه الموجب أو السالب، ولكنّ مقدارها يعتمد على مقدار x فقط.









الشكل 11-5 تتغير الطاقة من حركية إلى وضع، ثم العكس مع اهتزاز الزنبرك.

المثال المفاهيمي 11-3 مضاعفة الاتساع

افرض أنّ الزنبرك (الشكل 11-5) استطال إلى ضعف قيمته (أي $x=2A$). ماذا يحصل لـكلٍّ من: (أ) طاقة النظام؟ (ب) السرعة القصوى للكتلة المتأرجحة؟ (جـ) التسارع الأقصى للكتلة المتأرجحة؟

الحل: (أ) من (المعادلة 11-4 أ)، تتناسب الطاقة الكليّة مع مربع الاتساع A. لذا، فإنّ زيادة الاتساع إلى الضعف تزيد الطاقة إلى أربعة أمثال قيمتها الأولى ($2^2 = 4$). قد تعترض وتقول: "بذلت شغلًا لاستطالة الزنبرك من $x = 0$ إلى $x = A$، ألا أبذل شغلًا مساويًا عند الاستطالة من A إلى $2A$؟ كلا. لأنّ القوّة التي تؤثّر بها تتناسب مع x. إذن، بالنسبة إلى الاستطالة الثانية من $x = A$ إلى $x = 2A$ فإنّها تبذل شغلًا أكبر من الحالة الأولى من $x = 0$ إلى $x = A$.

(أ) من المعادلة 11-4 (ب) يمكننا رؤية أنّ الطاقة أصبحت أربعة أمثال الأولى. لذا، فإنّ السرعة تتضاعف

$$[v_{max} \propto \sqrt{E} \propto A.]$$

(جـ) بما أنّ القوة ضعف الأولى، لذلك يكون التسارع أيضا ضعف الأول

$a \propto F \propto x.$

تمرين ب: افرض أنّ الزنبرك في (الشكل 11-5) انضغط إلى $x = -A$، ثم أُعطي دفعةً نحو اليمين لتكون سرعته الابتدائية v_0. ما أثر هذه الدفعة في (أ) طاقة النظام؟ (ب) السرعة القصوى؟ (جـ) التسارع الأقصى؟

المثال 11-4 حسابات الزنبرك

يمتد زنبرك 0.150 m عندما تتدلّى منه كتلة 0.300-kg برفق كما في (الشكل 11-3 ب) . وضع الزنبرك أفقيًّا بحيث تستند الكتلة 0.300-kg إلى طاولةٍ ملساء كما في (الشكل 11-5). سُحبت الكتلة 0.100 m من وضع الاتزان ثمّ أُفلتت من السكون. احسب: (أ) ثابت صلابة الزنبرك k. (ب) اتساع الاهتزازة الأفقيّة. (جـ) مقدار أكبر سرعة v_{max}. (د) مقدار السرعة عندما تكون الكتلة على بعد 0.050 m من الاتزان. (هـ) مقدار أكبر تسارع a_{max} للكتلة.

النّهج: عندما تعلّق الكتلة 0.300-kg ساكنة من الزنبرك كما في(الشكل 11-3 ب) ، يطبق قانون نيوتن الثاني للقوى العمودية. $\Sigma F = 0 = mg - kx_0$. لذا $k = mg/x_0$، أمّا بالنسبة إلى الاهتزازات الأفقيّة فالاتساع معلوم، وتُحسب السرعات باستخدام قانون حفظ الطاقة، والتسارع من $F = ma$.

الحلّ: (أ) يمتدّ الزنبرك 0.150 m بسبب الوزن 0.300-kg ،

$$k = \frac{F}{x_0} = \frac{mg}{x_0} = \frac{(0.300\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2)}{0.150\,\text{m}} = 19.6\,\text{N/m}$$

(ب) الزنبرك الآن أفقي (على طاولة). امتدّ 0.100 m من وضع الاتزان، وأُعطي سرعة ابتدائيّة. إذن، $A = 0.100\,\text{m}$.

(جـ) السرعة القصوى v_{max} تصلها الكتلة عند مرورها بنقطة الاتزان حيث الطاقة كلّها حركيّة بمقارنة الطاقة الكليّة (المعادلة 11-3)، عند الاتزان بالطاقة عند أقصى ازاحة (امتداد)، نجد من حفظ الطاقة أنّ:

حيث $A = 0.100\,\text{m}$ أو قارن (المعادلتين 11-4 أ و ب). ثم حل المعادلة لايجاد قيمة v_{max} نجد أن:

$$\tfrac{1}{2}mv_{max}^2 + 0 = 0 + \tfrac{1}{2}kA^2$$

$$v_{max} = A\sqrt{\frac{k}{m}} = (0.100\,\text{m})\sqrt{\frac{19.6\,\text{N/m}}{0.300\,\text{kg}}} = 0.808\,\text{m/s}$$

(د) نستعمل حفظ الطاقة أو (المعادلة 11-5)المشتقّة منها لنجد

$$v = v_{max}\sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} = (0.808\,\text{m/s})\sqrt{1 - \frac{(0.050\,\text{m})^2}{(0\,100\,\text{m})^2}} = 0.70\,\text{m/s}$$

(هـ) من قانون نيوتن الثاني $F = ma$، يكون التسارع أكبر ما يمكن عندما تكون الإزاحة أكبر ما يمكن $x = A = 0.100\,\text{m}$

$$a_{max} = \frac{F_{max}}{m} = \frac{kA}{m} = \frac{(19.6\,\text{N/m})(0.100\,\text{m})}{0.300\,\text{kg}} = 6.53\,\text{m/s}^2$$

ملحوظة: لا نستطيع استعمال معادلات الحركة؛ (المعادلات 2-11)، لأنّ التسارع غير ثابت في الحركة التوافقية البسيطة SHM.

المثال 11-5 حسابات إضافية للزنبرك – الطاقة

فيما يتعلّق بالمهتزّ التوافقيّ البسيط في (المثال 11-4)، احسب: (أ) الطاقة الكليّة. (ب) طاقتي الحركة والوضع عند نصف الاتساع $(x = \pm A/2)$

النّهج: نستعمل حفظ الطاقة لنظام الكتلة –الزنبرك، المعادلتان 11-3، و 11-4.

الحلّ: (أ) مع $k = 19.6\,\text{N/m}$ و $A = 0.100\,\text{m}$ ، الطاقة الكلية E من (المعادلات 11-4أ) هي

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}(19.6\,\text{N/m})(0.100\,\text{m})^2 = 9.80 \times 10^{-2}\,\text{J}$$

(ب) عند $x = A/2 = 0.050\text{m}$

$$\text{PE} = \tfrac{1}{2}kx^2 = \tfrac{1}{2}(19.6\,\text{N/m})(0.050\,\text{m})^2 = 2.5 \times 10^{-2}\,\text{J}$$

ومن قانون حفظ الطاقة، يجب أن تكون الطاقة الحركيّة

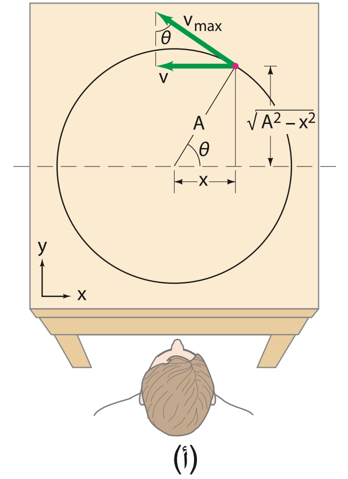
$$\text{KE} = E - \text{PE} = 7.3 \times 10^{-2}\,\text{J}$$

11-3 الزمن الدوري والطبيعة الجيبية لـ SHM

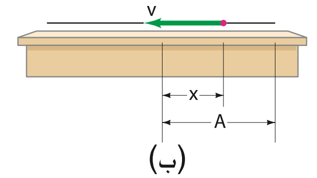
يعتمد الزمن الدوريّ للمهتزّ التوافقيّ على كلّ من صلابة الزنبرك والكتلة المتأرجحة "m". ولكن – كما يبدو غريبًا – فإنّ الزمن الدوريّ لا يعتمد على الاتساع. ويمكنك إثبات ذلك باستعمال ساعة من خلال إيجاد الوقت اللازم لعمل 10 أو 20 دورةً لزنبركٍ مهتزٍّ؛ لاتساعٍ صغيرٍ أولا، ومن ثمّ لاتساعٍ كبير.

يمكننا اشتقاق الزمن الدوريّ للحركة التوافقيّة البسيطة (SHM) بمقارنة SHM بجسمٍ يدور في دائرة. ومن هذه الدائرة المرجعيّة، يمكننا الحصول على نتيجةٍ ثانيةٍ مهمَّةٍ وهي صيغةٌ لموقع الكتلة المتأرجحة كدالّةٍ في الزمن.

في الواقع، لا يوجد شيءٌ يدور في دائرة عندما يهتزّ الزنبرك خطيًّا، لكن التشابه الرياضيَّ الذي نحصل عليه سيكون مفيدًا.



(أ)



(ب)

الشكل 11-6 (أ) حركة دائرية لجسم (أحمر) صغير. (ب) منظر جانبي لحركة دائرية (مركبة x) هي حركة توافقية بسيطة.

الزمن الدوري والتردد

افترض جسمًا صغيرًا كتلته m يدور باتّجاه عكس اتّجاه عقارب الساعة في دائرة نصف قطرها A بسرعةٍ ثابتة v_{max}، على سطح طاولةٍ كما هو مبين في (الشكل 11-6). عند النظر إليه من الأعلى، تكون الحركة دائريّةً في المستوى xy. إلّا أنّ الشخص الذي ينظر إلى الحركة من حافة الطاولة، سيرى حركةً اهتزازيّةً نحو الخلف والأمام، وهذه الحركة الخطيّة تنسجم تمامًا مع الحركة التوافقيّة البسيطة كما سنشاهد الآن.

ماذا يرى الشخص؟ وما المهمّ بالنسبة لنا؟ إنّه مسقط الحركة الدائريّة على محور السينات (الشكل 11-6 ب). لذا، فهذه الحركة السينيّة تناظر SHM. دعنا نحسب مقدار المركبة السينيّة للسرعة v_{max} التي تدعى v في (الشكل 11-6). المثلثان المحتويان على θ في (الشكل 11-6 أ) متشابهان، لذلك

$$\frac{v}{v_{max}} = \frac{\sqrt{A^2 - x^2}}{A}$$

أو

$$v = v_{max}\sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}$$

وهذه بالضبط معادلة السرعة لكتلة تهتزّ بحركةٍ توافقيّةٍ بسيطةٍ كما رأينا في (المعادلة 11-5). وهكذا المسقط على المحور x لجسمٍ يدور في دائرةٍ له الحركة نفسها مثل كتلة في نهاية زنبرك.

والآن، يمكننا تحديد الزمن الدوري لـ SHM لأنّه يساوي زمن الجسم الدائر عندما يعمل دورةً كاملةً. نلاحظ أولًا أنّ السرعة v_{max} تساوي محيط الدائرة (مسافة) مقسومًا على الزمن الدوري T

$$v_{max} = \frac{2\pi A}{T} = 2\pi A f \qquad \textbf{(11-6)}$$

ونحل لإيجاد الزمن الدوري T

$$T = \frac{2\pi A}{v_{max}}.$$

لحفظ الطاقة، من المعادلتين 11-4 أ و11-4 ب لدينا $\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_{max}^2$ لذلك $A/v_{max} = \sqrt{m/k}$ وهكذا

الزمن الدوري لـ SHO

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad \textbf{(11-7 أ)}$$

الزمن الدوري والتردد لـ SHM لا يعتمدان على الاتساع.

وهذه هي العلاقة التي نبحث عنها. تعتمد الفترة (الزمن الدوري) على الكتلة وصلابة الزنبرك k، ولكنّها لا تعتمد على الاتساع A. ونرى من (المعادلة 11-7 أ) أنّه كلّما كانت الكتلة أكبر، كان الزمن الدوريّ أكبر. وكلّما كان الزنبرك أصلب (k أكبر)، كان الزمن الدوريّ أقصر. وهذا منطقيٌّ؛ لأنّه كلّما زادت الكتلة زاد القصور، أي أنّ الاستجابة أبطأ (تسارع أصغر). وكلّما كبرت k زادت القوّة، وبالتالي فالاستجابة أسرع (تسارع أكبر). لاحظ أنّ (المعادلة 11-7 أ) ليست تناسبًا مباشرًا؛ يتغيّر الزمن الدوريّ مع الجذر التربيعيّ لـ m/k . فمثلًا، يجب أن يكون قدر الكتلة أربعة أضعاف لمضاعفة الزمن الدوري.

تتفق (المعادلة 11-7أ) تمامًا مع التجربة، وتنطبق، ليس فقط على الزنبرك، بل على أنواع الحركة التوافقية البسيطة كلّها؛ أي للحركة التي تخضع لقوة إعادة تتناسب مع الإزاحة، (المعادلة 11-1). يمكننا كتابة التردّد باستعمال $f = 1/T$ (المعادلة 11-2):

تردد (f) لـ SHM

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \textbf{(11-7ب)}$$

التمرين جـ: متى يكون ارتداد السيارة أسرع على زنبركاتها، عندما تكون فارغةً أم مليئةً تمامًا؟

المثال 11-6 قدّر **شبكة العنكبوت**

ينتظر عنكبوت كتلته 0.30 g في شبكته ذات الكتلة المهملة (الشكل 11-7). تسبّب حركةٌ خفيفةٌ اهتزاز الشبكة بتردّدٍ يقارب 15 Hz: (أ) احسب، بالتقريب، قيمة ثابت الصلابة لشبكة العنكبوت. (ب) بأيّ تردّد تتوقع أن تهتزّ الشبكة لو وقعت عليها حشرة كتلتها 0.10 g بالإضافة إلى العنكبوت؟

النّهج: يمكننا عمل تقريبٍ أوليٍّ لأنّ شبكة العنكبوت معقّدةٌ إلى حدٍّ ما ويمكن أن تهتزّ بعدّة تردّدات. وسنستعمل SHM كنموذج تقريبي.

الحل: (أ) تردّد SHM يعطَى (بالعلاقة 11-7 ب)

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

ومنها k تساوي

$$k = (2\pi f)^2 m$$
$$= (6.28 \times 15\,\text{s}^{-1})^2(3.0 \times 10^{-4}\,\text{kg}) = 2.7\,\text{N/m}.$$

(ب) الكتلة الكليّة الآن هي $0.10\,\text{g} + 0.30\,\text{g} = 4.0 \times 10^{-4}\,\text{kg}$. يمكننا تعويض الكتلة $m = 4.0 \times 10^{-4}\,\text{kg}$ في (المعادلة 11-7 ب)، ولكن بدلًا من ذلك، فإنّ التردّد يقلّ مع مقلوب الجذر التربيعيّ للكتلة. وبما أنّ نسبة الكتلة الجديدة إلى القديمة كنسبة $4/3$ مضروبةً في الكتلة الأولى، فإنّ التردّد يتغيّر بمعامل $1/\sqrt{4/3} = \sqrt{3/4}$ وهكذا $f = (15\,\text{Hz})(\sqrt{3/4}) = 13\,\text{Hz}$

ملحوظة: اختبر هذه النتيجة بالتعويض المباشر لقيمة k التي وجدناها في الفرع (أ) والكتلة الجديدة في (المعادلة 11-7ب).



الشكل 11-7 العنكبوت ينتظر فريسته (المثال 11-6).

الموقع كدالة في الزمن

نستعمل الآن الدائرة المرجعيّة لإيجاد موقع الكتلة التي تتحرّك حركةً توافقيّةً بسيطةً كدالّةٍ في الزمن. من (الشكل 11-6)، نرى أنّ $\cos\theta = x/A$. لذا، فإنّ مسقط موقع الجسم على محور x هو

$$x = A\cos\theta$$

لأنّ الكتلة تدور بسرعة زاوية ω، ويمكننا كتابة $\theta = \omega t$ حيث θ بالراديان (بند 8-1). وهكذا

الموقع

$$x = A\cos\omega t \qquad \textbf{(11-8أ)}$$

وعلاوة على ذلك، بما أنّ السرعة الزاوية ω (تعطى بالراديان / ثانية) فيمكن كتابتها على الصورة $\omega = 2\pi f$، حيث f هو التردد (المعادلة 8-7)، ثم نكتب

كدالة في زمن (SHM)

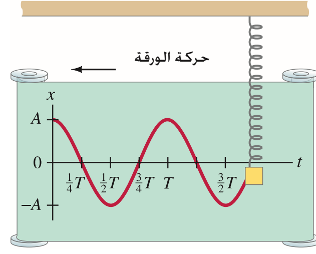
$$x = A\cos(2\pi f t) \qquad \textbf{(11-8ب)}$$

أو بدلالة الزمن الدوري T

$$x = A\cos(2\pi t/T) \qquad \textbf{(11-8جـ)}$$

لاحظ في (المعادلة 11-8جـ)أنه عندما $t = T$ (أي بعد زمن يساوي زمنًا دوريًّا) يكون عندنا cosine 2π وهي نفسها cosine صفر. وهذا معقول لأنّ الحركة تعيد نفسها كلّ زمن $t = T$.

تنويه: t زمن متغير، أمّا T فثابت لوضع معين.



الشكل 11-8 الموقع دالة في الزمن
$x = A\cos(2\pi t/T)$

كما رأينا، المركبة x لحركة جسمٍ يدور بانتظام تنسجم بدقّةٍ مع حركة مهتزٍّ توافقيٍّ بسيط. وهكذا، فإنّ (المعادلة 11-8) تعطي موقع الجسم الذي يتحرك حركة توافقية بسيطة. وبما أنّ دالة cosine (جيب التمام) تتغير بين 1 و 1− ، فإنّ x تتغير بين $-A$ و A، كما يجب أن تكون. إذا ثُبّت قلمٌ بكتلةٍ مهتزّةٍ عندما تتحرّك ورقة تحتها (الشكل 11-8)، فإنّ المنحنى الذي سيُرسم يتفق تمامًا مع (المعادلة 11-6) .

المثال 11-7 نبدأ بـ $x = A\cos\omega t$.

تُوصف إزاحة جسمٍ بالمعادلة التالية؛ حيث x بالأمتار، وt بالثواني:
$$x = (0.30\ \text{m})\cos(8.0\,t)$$

للجسم المهتز، احسب كلًّا من: (أ) الاتساع. (ب) التردد. (جـ) الزمن الدوريّ. (د) أكبر سرعة. (هـ) أكبر تسارع.

النّهج: نبدأ بمقارنة المعادلة المعطاة بالمعادلة 11-8 ب، $x = A\cos(2\pi f t)$

الحلّ: من $x = A\cos(2\pi f t)$ نرى بالتمعّن أنّ: (أ) الاتساع $A = 0.30\ \text{m}$ (ب) $2\pi f = 8.0\ \text{s}^{-1}$ وهكذا $f = (8.0\ \text{s}^{-1}/2\pi) = 1.27\ \text{Hz}$. (جـ) ثم $T = 1/f = 0.79\ \text{s}$ (د) أكبر سرعة (انظر المعادلة 11-8)

$$v_{max} = 2\pi A f = (2\pi)(0.30\ \text{m})(1.27\ \text{s}^{-1}) = 2.4\ \text{m/s}$$

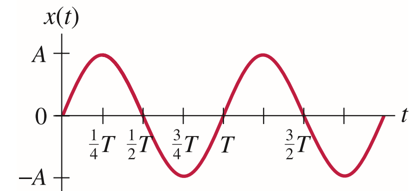
(هـ) التسارع الأكبر، من قانون نيوتن الثاني

$$a_{max} = F_{max}/m = kA/m$$ من (المعادلة 11-7ب)

نرى أنّ $k/m = (2\pi f)^2$ ، وبالتالي
$$a_{max} = \frac{k}{m}A = (2\pi f)^2 A = (2\pi)^2(1.27\ \text{s}^{-1})^2(0.30\ \text{m}) = 19\ \text{m/s}^2$$

الحركة الجيبية

من (المعادلة 11-8) ، $x = (A)\cos wt$، افرض أنّ الجسم المهتز يبدأ من السكون $(v = 0)$ عند أقصى إزاحةٍ له $(x = A)$ عند $t = 0$. هناك معادلاتٌ أخرى للحركة التوافقيّة البسيطة ممكنةٌ أيضًا، اعتمادًا على الظروف الابتدائية (عندما تختار t كي تكون صفرًا). فمثلًا، عند $t = 0$، إذا كان الجسم في موقع الاتزان، وبدأت الاهتزازات بإعطاء الجسم دفعة إلى اليمين $(+x)$ ، فإنّ المعادلة تصبح
$$x = A\sin\omega t = A\sin(2\pi t/T)$$
هذا المنحنى (الشكل 11-9) له شكل منحنى cosine نفسه المبين في (الشكل 11-8) ، ماعدا أنَّه مُزاحٌ إلى اليمين بربع دورةٍ. لذلك، عندما $t = 0$ تبدأ $x = 0$ عند بدلًا من عند $x = A$.
يُدعى كلّ من المنحنيين sine و cosine بأنّه جيبي (شكل دالة الجيب). وهكذا، فالحركة التوافقيّة البسيطة* يُقال لها جيبيّة لأنّ الموقع يتغيّر كدالة جيبيّة مع الزمن.



الشكل 11-9 الطبيعة الجيبية لـ SHM مع الزمن، في هذه الحالة تكون $t = 0$ لأنه عندما $x = A\sin(2\pi t/T)$ ولكنها تمتلك أيضا. $x = 0$ الكتلة في الموقع وهذا يحملها إلى $t = 0$ سرعة ابتدائية $t = \frac{1}{4}T$ عندما $x = A$

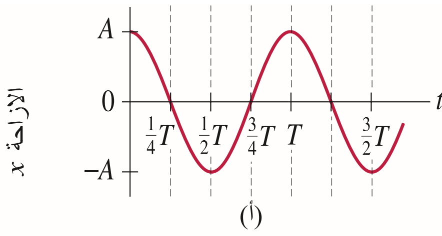
SHM حركة جيبية.

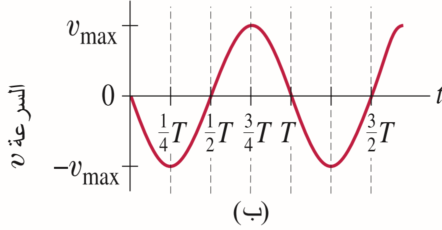
* يمكن تعريف الحركة التوافقيّة البسيطة بأنّها الحركة الجيبيّة. وهذا التعريف يتفق تمامًا مع تعريفنا الأول في (البند 11-1) .

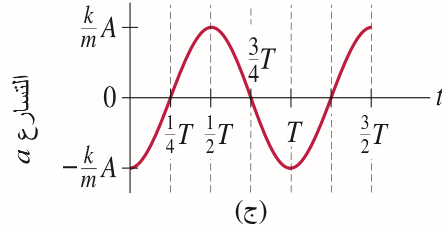
*السرعة والتسارع كدالة في الزمن

يبيّن (الشكلان 11-10 أو 11-8) رسمًا للإزاحة x مع الزمن t، كما يُعطى (بالمعادلة 11-8) . ويمكننا أيضًا إيجاد السرعة v دالة في الزمن من (الشكل11-6أ) . للموقع المبين (الأحمر المنقط في الشكل 11-8أ) نرى أنّ مقدار v هو $v_{max} \sin\theta$، ولكن v تشير إلى اليسار. لذلك $v = -v_{max}\sin\theta$. مرة أخرى نضع $\theta = \omega t = 2\pi f t = 2\pi t/T$ نجد أنّ

$$v = -v_{max}\sin\omega t = -v_{max}\sin(2\pi f t) = -v_{max}\sin(2\pi t/T) \quad \textbf{(9-11)}$$







الشكل 11-10 تبين الرسومات
(أ) الإزاحة x كدالة في الزمن
t: $x = A\cos(2\pi t/T)$
(ب) السرعة مع الزمن
$v = -v_{max}\sin(2\pi t/T)$
(جـ) التسارع كدالة في الزمن
$a = -(kA/m)\cos(2\pi t/T)$

بعد $t = 0$ مباشرةً، تكون السرعة سالبةً (تشير نحو اليسار وتبقى كذلك حتى $t = \frac{1}{2}T$ (وهذا يقابل $\theta = 180° = \pi$ rad) وبعد $t = \frac{1}{2}T$ ، حتى $t = T$ حيث تكون السرعة موجبة. السرعة كدالة في الزمن (المعادلة 11-9) مرسومة في (الشكل 11-10ب). من (المعادلتين 11-6 و 11-7ب)

$$v_{max} = 2\pi A f = A\sqrt{\frac{k}{m}}$$

لنظام زنبرك ـ كتلةٌ، تكون السرعة القصوى v_{max} أعلى، إذا كان الاتساع أكبر. وهذا يحصل دائمًا عند مرور الكتلة بمركز الاتزان.

يمكن إيجاد التسارع مع الزمن من قانون نيوتن الثاني:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kx}{m} = -\left(\frac{kA}{m}\right)\cos\omega t = -a_{max}\cos(2\pi t/T) \quad \textbf{(10-11)}$$

حيث التسارع الأقصى $a_{max} = kA/m$ (المعادلة 11-10) مرسومةٌ في (الشكل 11-10جـ). ولأنّ التسارع لـ SHO ليس ثابتًا، فإنّ معادلات الحركة بتسارع منتظم لاتنطبق على الحركة التوافقية البسيطة (SHM).

المثال 11-8 السماعة (مكبر الصوت)

يهتز مخروط السماعة بحركةٍ توافقيّةٍ بسيطةٍ تردّدها 262 Hz ("متوسط C"). والاتساع عند مركز المخروط هو $A = 1.5 \times 10^{-4}$ m عند $x = A$ ، $t = 0$ (أ) ما المعادلة التي تصف حركة مركز المخروط؟ (ب) ما السرعة والتسارع كدالة في الزمن؟ (جـ) ما موقع المخروط عندما $t = 1.00$ ms $(= 1.00 \times 10^{-3}$ s$)$؟

النّهج: تبدأ الحركة عندما $(t = 0)$، ويكون المخروط في أقصى إزاحته $(x = A$ at $t = 0)$. لذا، نستعمل دالة الـ cosine (جيب التمام)، $x = A\cos\omega t$، لوصف الحركة التوافقية البسيطة SHM.

الحل: (أ) هنا

$$\omega = 2\pi f = (6.28 \text{ rad})(262 \text{ s}^{-1}) = 1650 \text{ rad/s}$$

توصف الحركة بـ

$$x = A\cos(2\pi f t) = (1.5 \times 10^{-4} \text{ m})\cos(1650t)$$

(ب) أكبر سرعة من (المعادلة 11-6)هي $v_{max} = 2\pi A f$

$$2\pi(1.5 \times 10^{-4} \text{ m})(262 \text{ s}^{-1}) = 0.25 \text{ m/s}$$

في حين تعطينا (المعادلة 11-9)

$$v = -(0.25 \text{ m/s})\sin(1650t)$$

ومن (المعادلتين 11-10 و 11-7 ب) فإنّ التسارع الأكبر هو

$$(2\pi f)^2 A = 4\pi^2(262 \text{ s}^{-1})^2(1.5 \times 10^{-4} \text{ m}) = 410 \text{ m/s}^2$$

وهذا أكبر من 40g، حيث تشير g إلى تسارع الجاذبية الأرضيّة .

أي

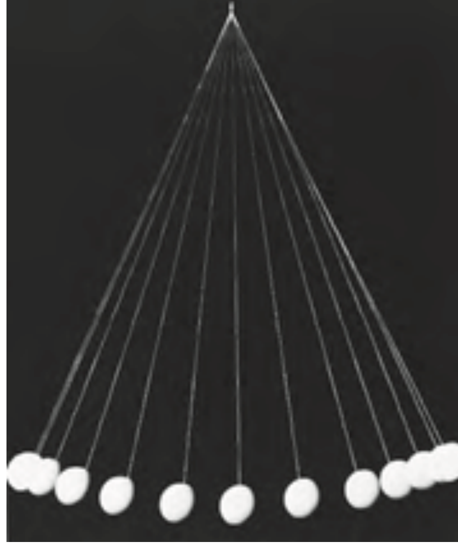
$$a = -(410 \text{ m/s}^2)\cos(1650t)$$

(جـ)عندما $t = 1.00 \times 10^{-3}$ s، (المعادلة 11-8 أ) تعطينا

$$x = A\cos\omega t = (1.5 \times 10^{-4} \text{ m})\cos[(1650 \text{ rad/s})(1.00 \times 10^{-3} \text{ s})]$$
$$= (1.5 \times 10^{-4} \text{ m})\cos(1.65 \text{ rad}) = -1.2 \times 10^{-5} \text{ m}.$$

ملحوظة: تأكد أنّ حاسبتك موضوعة في RAD وليس في DEG لحساب الـ $\cos\omega t$.

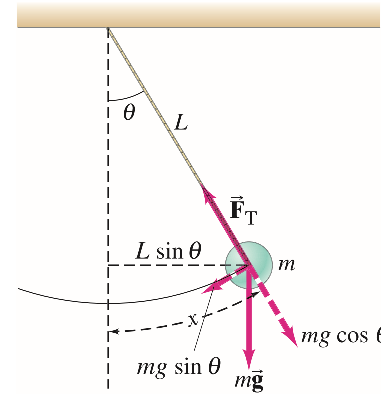
تنويه:
تأكد دائما أنّ الحاسبة تعمل في النمط الصحيح للزاوية.



الشكل 11-11 صورة ومضية لبندول بسيط يتأرجح.

11-4 البندول البسيط

يتكوّن **البندول البسيط** من جسمٍ صغيرٍ (كرة البندول) معلّق من طرف خيطٍ خفيف، (الشكل 11-11). سنفترض عدم امتداد الخيط (عدم تغيّر طوله)، وأنّ كتلته يمكن إهمالها بالمقارنة مع كتلة الكرة. تشبه حركةُ البندول البسيط الذي يتأرجح إلى الخلف والأمام مع احتكاكٍ مهملٍ الحركةَ التوافقيَّة البسيطة: تتأرجح كرة البندول على طول قوسي من دائرة باتساعين متساويين على جانبي موضع الاتزان، وعند مرورها بنقطة الاتزان (حيث ستكون معلقة رأسيًّا) تكون سرعتها أكبر ما يمكن. ولكن، هل تتحرّك حركةً توافقيّةً بسيطة SHM؟ أي، هل تتناسب قوّة الإعادة مع الإزاحة؟ دعنا نجد ذلك.



الشكل 11-12 البندول البسيط ومخطط الجسم الحرّ.

تُعطى إزاحة البندول على طول القوس بـ $x=L\theta$ ، حيث θ الزاوية التي يميل بها الخيط عن العمودي، وL هو طول الخيط (الشكل 11-12). إذا كانت القوّة المعيدة تتناسب مع x أو θ ، فستكون الحركة توافقيّةً بسيطة. قوّة الإعادة هي القوّة المحصلة على الكرة، وتساوي مركبة الوزن mg المماسية للقوس:

$$F = -mg\sin\theta$$

حيث تشير g إلى تسارع الجاذبيّة الأرضيّة. وتعني الإشارة السالبة هنا، كما في (المعادلة 11-1)، أنّ القوّة في اتجاهٍ مضادٍّ للإزاحة ممثلةً بالزاوية θ. ولأنّ القوّة تتناسب مع جيب الزاوية θ وليس مع θ نفسها، فالحركة ليست SHM. وعلى أيّ حال، إذا كانت الزاوية θ صغيرة، فإنّ $\sin\theta$ تقريبًا يساوي θ عندما تكتب الأخيرة بالراديان. ويمكن رؤية ذلك بملاحظة أنّ طول القوس x $(= L\theta)$ في (الشكل 11-12) يساوي طول الخيط $(= L\sin\theta)$ نفسه تقريبًا. وهو المشار إليه بخطٍّ أفقيٍّ متقطعٍ إذا كانت θ صغيرة.

الزاويا أقلّ من 15°، والفرق بين θ(راديان) و$\sin\theta$ أقلّ من 1%، انظر (الجدول 11-1) . وهكذا، وبتقريبٍ جيّدٍ للزاويا الصغيرة، فإنّ $F = -mg\sin\theta \approx -mg\theta$

بتعويض $\theta = x/L$ أو $x = L\theta$، نحصل على

$$F \approx -\frac{mg}{L}x$$

وهكذا للإزاحات الصغيرة، فإنّ الحركة بصورةٍ جوهريّةٍ هي حركةٌ توافقيّةٌ بسيطة. وبما أنّ هذه المعادلة تطابق قانون هوك

$F = -kx$، فإنّ ثابت القوة k يساوي $k = mg/L$.

الجدول 11-1
$\sin\theta$ عند زوايا صغيرة

θ درجة	θ راديان	$\sin\theta$	% النسبة المئوية للفرق
0	0	0	0
1°	0.01745	0.01745	0.005%
5°	0.08727	0.08716	0.1%
10°	0.17453	0.17365	0.5%
15°	0.26180	0.25882	1.1%
20°	0.34907	0.34202	2.0%
30°	0.52360	0.50000	4.7%

إذا عوّضنا $k = mg/L$ في (المعادلة 11-7أ)، نحصل على الزمن الدوريّ للبندول البسيط .

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/L}}$$

أو $$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$ [عندما تكون θ صغيرة] **(11-11أ)**

الزمن الدوري، البندول البسيط

التردد $f = 1/T$ ، لذلك

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}.$$ [عندما تكون θ صغيرة] **(11-11ب)**

تردد البندول البسيط.

كتلة كرة البندول m لم تظهر في هذه الصيغ لـ T و f. وبذلك يكون لدينا نتيجةٌ مدهشةٌ وهي أنّ الزمن الدوريَّ والتردّد للبندول البسيط لايعتمدان على كتلة كرة البندول. وقد تكون لاحظت هذا عندما تدفع طفلًا صغيرًا أو كبيرًا على الأرجوحة.

تطبيق الفيزياء
ساعة البندول.

كذلك نرى من (المعادلة 11-11أ) أنّ الزمن الدوريَّ للبندول لايعتمد على الاتساع (مثل الـ SHM، البند 11-3)، مادام الاتساع θ صغيرا. يقال إنّ جاليليو لاحظ ذلك أولًا عندما كان يراقب تأرجح مصباح كنيسة (الشكل 11-13). وقد أدّت هذه الحقيقة إلى اكتشاف ساعة البندول التي تعدّ أول أداة توقيتٍ دقيقة، وما زالت معتمدةً منذ قرونٍ خلت.

المثال 11-9 قياس g

يستعمل جيولوجي بندولًا بسيطًا طول خيطه 37.10 cm وتردّده 0.8190 Hz في مكانٍ محدّدٍ على الأرض. ما قيمة تسارع الجاذبيّة الأرضيّة في هذا المكان؟

النّهج: يمكننا استعمال الطول L، والتردّد f في (المعادلة 11-11ب)، والتي تحتوي المجهول g.

الحلّ: نحلّ (المعادلة 11-11ب) لإيجاد g لنحصل على

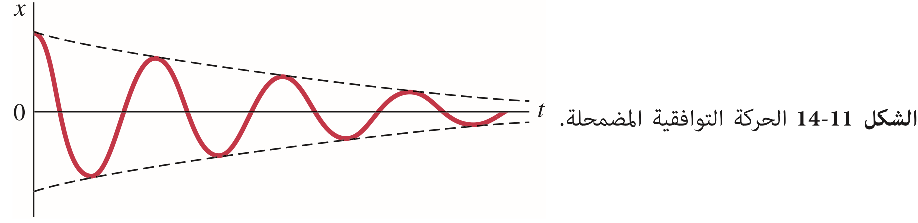
$$g = (2\pi f)^2 L = (6.283 \times 0.8190\ \text{s}^{-1})^2(0.3710\ \text{m}) = 9.824\ \text{m/s}^2$$

التمرين د: (أ) احسب، بالتقريب، طول البندول في ساعة الجدّ التي تدقُّ مرَّةً في الثانية. (ب) كم سيكون الزمن الدوريُّ لساعة طول بندولها 1.0 m؟

تنطبق (المعادلتان 11-11) على بندولٍ بسيط، كتلة مركزه عند نهاية خيط مهمل الثقل، ولكن ليس على تأرجحِ مضرب البيسبول المعلّق من نهايته.



الشكل 11-13 تأرجح هذا المصباح المعلق من حبلٍ طويلٍ في سقف كنيسة. يُقال إنّ هذا ما لاحظه جاليليو، وهو الذي قاده إلى استنتاج أنّ الزمن الدوريَّ للبندول لايعتمد على الاتساع.

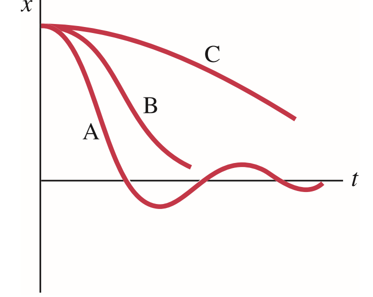


الشكل 11-14 الحركة التوافقية المضمحلة.

11-5 الحركة التوافقية المضمحلة

إنّ اتساع أيّ زنبركٍ مهتزٍّ حقيقيٍّ أو بندولٍ متأرجح سوف يتناقص ببطءٍ مع الزمن إلى أن تتوقّف هذه الاهتزازات. يعرض (الشكل 11-14) رسمًا نموذجيًّا للإزاحة كدالةٍ في الزمن، وهذا ما يُطلق عليه الحركة التوافقيّة المضمحلّة. يُعزى الاضمحلال* بشكلٍ عامٍّ إلى مقاومة الهواء والاحتكاك الداخلي للنظام المهتز. وأنّ الطاقة الضائعة والمتحولة إلى طاقةٍ حراريةٍ تؤدّي إلى تناقص الاتساع لهذه الاهتزازات.

وبما أنّ الأنظمة المهتزّة الطبيعيّة تتضمحلُّ بشكلٍ عام، فلماذا إذن نتكلّم عن الحركة التوافقيّة غير المضمحلّة؟ والحلُّ هو أنّ التعامل مع الحركة التوافقيّة البسيطة أسهل بكثيرٍ من الناحية الرياضية. وإذا كان الاضمحلال ليس كبيرًا، فيمكن التفكير بالاهتزازات لحركةٍ توافقيّةٍ بسيطة، ويُضاف إليها أثر الاضمحلال. يمثل نقصُ الاتساع الذي تبيّنه الخطوط المتقطّعة في (الشكل 11-14) الاضمحلالَ. وعلى الرغم من أنّ الاضمحلال الناجم عن الاحتكاك يؤدّي إلى تغيّر تردّد الاهتزاز؛ فإنّ الأثر يكون صغيرًا عادةً، إلا إذا كان الاضمحلال كبيرًا. وهكذا يمكن تطبيق (المعادلات 11-7) في معظم الحالات.



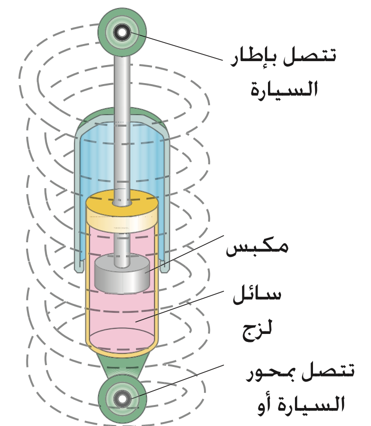
الشكل 11-15 المنحنيات تمثل A تحت اضمحلال. B حرج الاضمحلال. C فوق الاضمحلال.

يكون الاضمحلال أحيانًا كبيرًا، إلى درجة أنّ الحركة لا تحاكي الحركة التوافقية البسيطة. وهناك ثلاث حالات عامّة في أنظمة الاضمحلال الكبير مبيّنة في (الشكل 11-15) . يمثّل المنحنى A وضع تحت الاضمحلال، وفيه يعمل النظام عدة اهتزازات قبل وصوله إلى السكون المنحنى. أما المنحنى C فيمثّل وضع فوق الاضمحلال الذي يكون فيه الاضمحلال كبيرًا لدرجة أنه يستغرق وقتًا كبيرًا للوصول إلى الاتزان. في حين يمثّل المنحنى B وضع الاضمحلال الحرج، وهنا يصل النظام إلى الاتزان في أقصر وقت. وهذه التعبيرات مشتقة من استعمال الأنظمة المضمحلة العملية مثل آلية غلق الأبواب، وواقيات الصدمات في السيارة (الشكل 11-16)، حيث تصمم هذه الأدوات عادة لإعطاء اضمحلال؛ يغلق الباب بعنف، وتهتز السيارة عدة مرّات نحو الأعلى والأسفل في كلّ مرة تجتاز (عائقا) مطبّا.

تطبيق الفيزياء
ماصات الصدمة.

في معظم الأنظمة، ما يهمنا هو الحركة الاهتزازية كما في الساعات، حيث نعمل على تقليل الاضمحلال. وفي أنظمة أخرى تعدّ الاهتزازات مشكلة، مثل زنبركات السيارات. لذلك، فالمطلوب هو قدرٌ مناسب من الاضمحلال (أي الحرج). والاضمحلال المصمّم بصورة جيدة مطلوب في تطبيقات كثيرة. فالبنايات العالية خاصة في كاليفورنيا تبنى الآن مع مخامدات ضخمة لتقليل أثر دمار الهزات الأرضيّة. (الشكل 11-17).

* يضمحل تعني يتضاءل، يذوي، يثّبط، مثل يخمد أنفاس شخص ما.



الشكل 11-16 زنبرك السيارة وواقي الصدمة تساعدان في خمود السيارة بحيث لا تهتزّ إلى الأعلى والأسفل كثيرا.

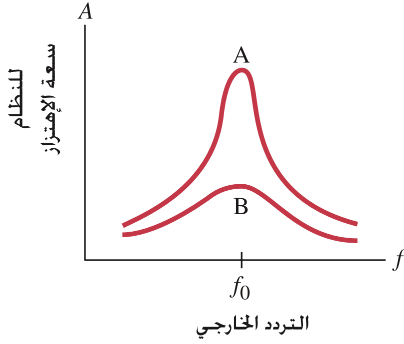


الشكل 11-17 توضع هذه المخامدات الضخمة في البناية، وتشبه كثيرا عمل واقي الصدمة في السيارة، كما تخدم غرضا مشابها لتقليل الاتساع وتردد الاهتزازات عند حدوث الهزات الأرضيّة.

6-11 الاهتزازات القسرية؛ الرنين

عندما يبدأ نظام مهتز بالحركة، فإنّه يهتزّ بتردده الطبيعي (المعادلتان 11-7(ب) و11-11(ب). ولكن قد تؤثر قوة خارجية في النظام، ويكون لها تردد خاص بها عندما يكون لدينا اهتزاز قسري. فمثلاً، يمكن سحب الكتلة على الزنبرك في (الشكل 11-1) إلى الأمام والخلف بتردد خارجي f. عندها، تهتز الكتله بالتردد f للقوة الخارجية، حتى لو كان هذا التردد مختلفا عن **التردد الطبيعي** للزنبرك الذي يرمز إليه بـ f_0 حيث (انظر المعادلة 11-7 ب)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$



الشكل 11-18 (أ) الرنين في نظام اضمحلاله قليل.(ب) الرنين في نظام اضمحلاله كبير.

في الاهتزاز القسري، وجد أنّ تسارع الاهتزاز يعتمد على الفرق بين f و f_0، ويصبح أكبر ما يمكن عندما يكون تردد القوة الخارجية f مساويا للتردد الطبيعي للنظام f_0؛ أي عندما $f = f_0$. يرسم الاتساع في (الشكل 11-18) كدالة في تردد القوة الخارجية f. يمثل المنحنى اضمحلالاً خفيفا، في حين يمثل المنحنى B اضمحلالاً ثقيلا. وقد يصبح الاتساع كبيرا عندما يقترب التردد الخارجي المؤثر f من التردد الطبيعي للنظام $f \approx f_0$، مادام ازدياد الاتساع كبيرا عند $f = f_0$، وما دام الاضمحلال ليس كبيرا. عندما يكون الاضمحلال قليلا، فإنّ ازدياد الاتساع يكون كبيرًا جدًّا عند $f = f_0$ (وعادة مفاجئا). ويُسمّى هذا الأثر "**رنينا**". أمّا التردد الطبيعي للنظام f فيُسمّى **تردّدَ الرنين**.

تطبيق الفيزياء
التأرجح

توضيح بسيط للرنين يتمثل في دفع طفل على أرجوحة. فالأرجوحة، كأيّ بندول، لها تردد طبيعي للاهتزاز. إذا دفعت الأرجوحة بأيّ تردد، فإنّها تتحرك جيئة وذهابا دون أن تصل إلى اتساع كبير. ولكن إذا دفعتها بتردد يساوي ترددها الطبيعي، فإنّ الاتساع يزداد بصورة كبيرة. لذا، فإنك عند الرنين بحاجة إلى الدفع بسهولة للوصول إلى إزاحة كبيرة.

تطبيق الفيزياء
تحطم الزجاج من خلال الرنين

يقال إنّ المغني العظيم أنريكو كاروزو كان قادرا على تحطيم قدح بلوري عندما يغني بتردد يساوي تردد القدح وبصوت عال. هذا مثال على الرنين، حيث تعمل موجات صوت المغني كاهتزاز قسري على الزجاج. وعند الرنين، يكون الاهتزاز الناتج للقدح كبير الاتساع لدرجة أنّ الزجاج يتجاوز حدود المرونة فينكسر.

تطبيق الفيزياء
انهيارات بسبب الرنين.

يعدّ الرنين ظاهرة مهمة في كثير من المواقف؛ لأنّ الأجسام المادية مرنة بشكل عام. وبشكلٍ خاص، فهذه الظاهرة مهمة في البناء، رغم أنّ أثر ذلك لايتنبأ به عادة. مثلا، هناك تقرير ورد حول انهيار جسر سكّة حديد لأنّ إحدى العجلات في قطار يعبر الجسر سبّبت اهتزاز رنين في الجسر. كما أنّ طابور الجنود الذين يجتازون جسرًا ما، يطلب إليهم السير بصورة عشوائية وليست المشية العسكرية المنتظمة لتجنب إحداث اهتزاز رنين في الجسر. ويُعزى سبب انهيار جسر مضايق تاكوما (الشكل 11-19 أ) عام 1940 إلى هبوب رياح عاصفة اتفق ترددها مع تردد رنين الجسر مما أدّى إلى تأرجحه باتساع كبير. لذا، تصمم الجسور والمباني العالية حاليا باضمحلال كبير منذ إنشائها. ومن الأمثلة على ذلك أيضا انهيار طريق أوكلاند عام 1989 نتيجة زلزال كاليفورنيا (الشكل 11-19 ب) بسبب تأرجح رنين لجزء منه بُني على الطين.

ولكن الرنين مفيد جدّا أحيانا أخرى، وسنرى أمثلة كثيرة لاحقا، كما في في الآلات الموسيقية، وتوليف الراديو. وسنرى أنّ الأجسام المهتزة ليس لها تردد رنين واحد؛ بل الكثير.

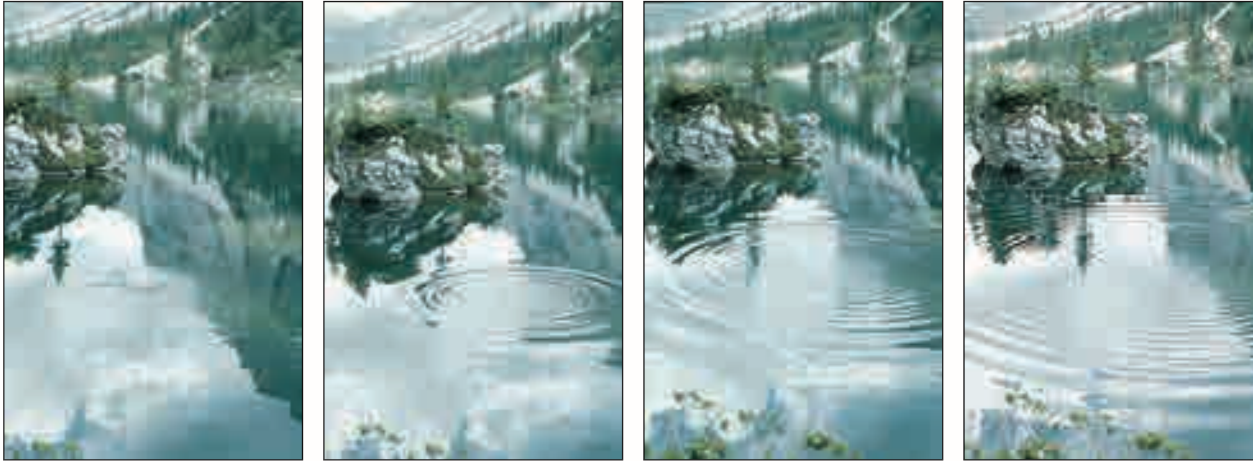


(أ)



(ب)

الشكل 11-19 (أ) اهتزازات واسعة الاتساع لجسر مضايق تاكوما بسبب رياح عاصفة أدت لانهياره (1940) (ب) انهيار طريق في كاليفورنيا بسبب زلزال 1989 حيث كان للرنين دور مهم في ذلك.

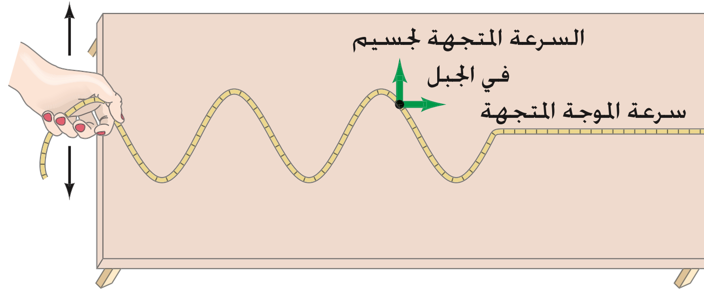


الشكل 11-20 موجات الماء تنتشر بعيدا عن المصدر.

7-11 الحركة الموجية

عندما تلقي حجرًا في بحيرة أو بركة من الماء، تتشكل موجات دائرية تتحرّك نحو الخارج، (الشكل 11-20) . وكذلك تتحرك الموجات في حبل مشدود على طاولة إذا هُزّت إحدى نهايتيه إلى الخلف كما هو مبين في (الشكل 11-21). تعدّ موجات الماء والموجات في حبل مثالين شائعين على الحركة الموجية. وسنناقش أنواعًا أخرى من الموجات لاحقًا، ولكن سنركز الآن على **الموجات الميكانيكية** هذه.

هل راقبت في يوم من الأيام موجات البحر المتحركة نحو الشاطىء قبل أن تتكسر*، قد تعجب فيما لو حملت هذه الموجات الماء من أقصى البحر إلى الشاطىء. كلا إنها لا تحضر الماء من بعيد. إنّ موجات الماء تسير بسرعة واضحة. ولكن كلّ جسم (أو جزيء) من الماء يهتز حول نقطة اتزان فقط. وهذا واضح من حركة أوراق الأشجار عندما تعبر الموجات. إلا أنّ الأوراق (أو الفلين) لا تُحمل مع الموجات، بل تهتزّ حول نقطة اتزان لأنّ هذه هي حركة الماء نفسها.



الشكل 11-21 موجة تسير عبر حبل، تتحرك الموجة نحو اليمين على طول الحبل. جسيمات الحبل تهتز جيئة وذهابا على سطح الطاولة.

المثال المفاهيمي 11-10 سرعة الموجة مقابل سرعة الجسيم

هل سرعة الموجة التي تتحرك على طول وترٍ هي نفسها سرعة جُسيمٍ من الوتر؟ انظر (الشكل 21-11) .

الحل: لا، السرعتان مختلفتان في المقدار والاتجاه؛ فالموجة في الحبل (الشكل 11-21) تتحرك نحو اليمين، ولكن كلّ جزءٍ من الحبل يهتزُّ جيئةً وذهابًا. (بوضوح الحبل لا يتحرك باتجاه الموجات فيه).

تستطيع الموجات الحركة إلى مسافات بعيدة، إلا أنّ حركة الوسط (الماء أو الحبل) نفسه محدودة، فهو يهتز حول نقطة اتزان كما في الحركة التوافقية البسيطة. وهكذا، وعلى الرغم من أنّ الموجة ليست مادة، إلّا أنّها تستطيع الانتقال فيها. وتتكون الموجة من اهتزازات تتحرك دون أن تحمل المادة معها.

* لئلا تختلط عليك الأمور بشأن "تكسير" موجات البحر، والذي يحدث عندما تتفاعل الموجة مع الأرض في المياه الضحلة، وتصبح بالتالي موجة غير بسيطة.

تنقل الموجات الطاقة من مكان إلى آخر. وتحصل موجة الماء على الطاقة، فمثلًا، تنتقل الطاقة بواسطة الموجات إلى الشاطىء عن طريق إلقاء حجر في الماء، أو بواسطة رياح بعيدة في البحر. اليد المتأرجحة في (الشكل 11-21) تنقل الطاقة إلى الحبل، ومن ثم تنتقل هذه الطاقة عبر الحبل، وقد تنتقل إلى جسم عند طرفه الآخر. إنّ أنواع الموجات المتحركة جميعها تنقل الطاقة.

الموجات هي إنتقال الإهتزازات وليس إنتقال المادة

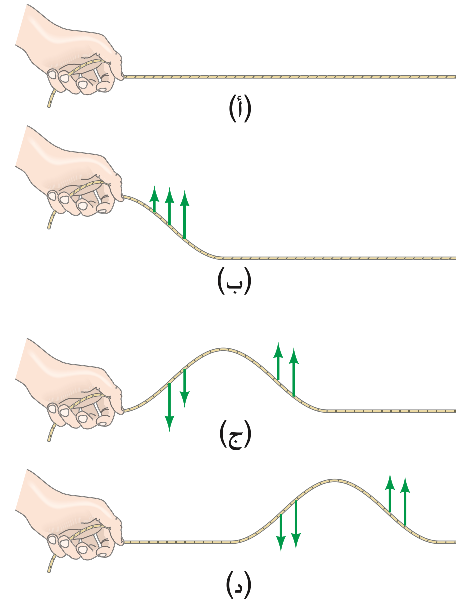
دعنا ننظر عن كثب كيفية تشكل الموجة وانتقالها. ننظر أولًا إلى نبضة منفردة. يمكن إنتاج نبضة منفردة في حبل بحركة سريعة نحو الأعلى والأسفل من اليد، (الشكل 11-22) ؛ تدفع اليد طرف الحبل إلى الأعلى، ولأنّ نهاية الحبل مربوطة بأجزاء أخرى مجاورة، فهذه الأخيرة تشعر بقوة إلى الأعلى، وبالتالي تبدأ بالحركة نحو الأعلى. وبسبب أنّ كلّ جزء مجاور من الحبل يتحرك نحو الأعلى، فإنّ قمة الموجة تتحرك خارجًا على امتداد الحبل، ويكون طرف الحبل في أثناء ذلك قد عاد إلى الوضع الأصلي بواسطة اليد. وكلّ جزء لاحق يصل إلى حدّه الأعلى، ثم يعود بفعل الجزء المجاور إلى الحبل. وهكذا هو مصدر الموجة المنتقلة، هو اضطراب. وتتسبب قوى التماسك بين الأجزاء المتجاورة من الحبل في تحريك النبضة بعيدًا. كما أنّ الموجات في أوساط أخرى تنتج وتنتقل نحو الخارج بطريقة مشابهة.

نبضة موجية.

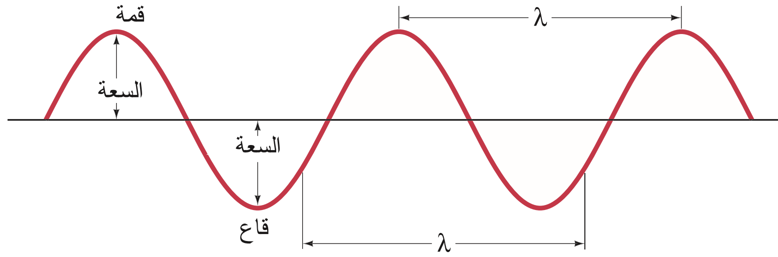
إنّ مصدر **موجة مستمرة** أو **دورية** كالمبينة في (الشكل 11-21) هو اضطراب مستمر ومهتز؛ أي أنّ المصدر هو اهتزاز أو تأرجح. في (الشكل 11-21)، تؤرجح اليد أحد طرفي الحبل. ويمكن أن تنتج موجات الماءِ من أيّ قسم مهتز عند السطح، مثل يدك، أو أنّ الماء نفسه يبدأ بالاهتزاز عندما تهب ريح عبره، أو إذا أُلقي حجرٌ فيه. تنتج الشوكة الرنّانة المهتزة أو غشاء الطبل موجات صوتية في الهواء. وسنرى لاحقًا أنّ اهتزاز الشحنات الكهربائية ينتج موجات ضوئية. وبالفعل، كلّ جسمٍ مهتزٍّ يصدر موجاتٍ تقريبًا.

موجة دورية

إذن، فمصدر أيّ موجة هو الاهتزاز، وهو الذي ينتقل نحو الخارج وبالتالي يشكّل الموجة. إذا اهتزّ المصدر بصورة جيبية في SHM، ثم الموجة نفسها – إذا كان الوسط تام المرونة – فسيكون لها شكل دالة جيبية في المكان والزمان. (1) في المكان: إذا أخذت صورة للموجة في المكان في لحظة زمنية محددة، فسيكون للموجة شكل الدالة الجيبية أو الجيب تمامية (sine or cosine) كدالة بالموقع. (2) في الزمن: إذا نظرت إلى حركة الوسط في مكان محدد خلال فترة زمنية طويلة – مثلًا لو نظرت بين عمودين قريبين إلى حركة الماء إلى الأعلى والأسفل- ستجد أنها لها حركة توافقية بسيطة. فالماء يتحرك نحو الأعلى والأسفل بصورة جيبية مع الزمن.



الشكل 11-22 حركة نبضة موجبة نحو اليمين. تشير الأسهم إلى سرعة جزيئات الحبل.



الشكل 11-22 الصفات المميزة لنبضة موجية.

بعض الكميات المهمة التي تستعمل لوصف موجة جيبية دورية مبينة في (الشكل 11-23) . تُسمَّى النقاطُ العليا في الموجة القممَ (جمع قمة)، أمّا النقاط السفلية فتُدعى قيعانًا "جمع قاع"؛ فالاتساع A هو أعلى ارتفاع للقمة أو عمق القاع بالنسبة إلى المستوى الطبيعي (الاتزان). والمسافة المباشرة من القمة إلى القاع تساوي ضعف الاتساع. في حين تُسمَّى المسافةُ بين قمتين متتاليتين **طولَ الموجة** λ (الرمز اليوناني لامدا). كما أنّ طول الموجة يساوي المسافة بين أيّ نقطتين متماثلتين متتاليتين على الموجة. ويشير **التردد** f إلى عدد القمم – أو الدورات الكاملة – التي تعبر نقطة معينة لكلّ وحدة زمن. أمّا الزمن الدوري T, فيساوي $1/f$ الذي ينقضي بين قمتين متتاليتين تمران بالنقطة نفسها.

السعة A

طول الموجة λ

التردد f

الزمن الدوري T

وتدلّ **سرعة الموجة** v على سرعة مرور قمة الموجة، أو أيّ نقطة عليها. ويجب تمييز سرعة الموجة من سرعة الجسم في الوسط كما رأينا في المثال 11-10.

سرعة الموجة، v

تقطع قمة الموجة مسافةً تساوي طول الموجة λ في زمنٍ يساوي الزمن الدوري T. وهكذا، فإنّ سرعة الموجة هي: $v = \lambda/T$. ولكن، لأنّ $f = 1/T$، فإنّ

$$v = \lambda f \qquad \textbf{(12-11)}$$

$v = f\lambda$ (موجات جيبية)

مثلاً، افرض أنّ موجةً طولها 5 m، وترددها 3 Hz، بما أن ثلاث قمم سوف تعبر نقطةً معيّنة في الثانية، والبعد بين القمم هو 5 m، فإن أول قمة (أو أي جزء من الموجة) سوف ينتقل مسافة 15 m خلال ثانية واحدة. إذن فسرعتها 15 m/s.

تعتمد سرعة الموجة على خصائص الوسط الذي تنتقل فيه.

إنّ سرعة الموجة في وتر أو حبل مشدود- مثلاً- تعتمد على قوة الشد في الحبل F_T، وكذلك على كتلة وحدة الطول للحبل m/L . إنّ العلاقة للموجات ذات الاتساع الصغير هي

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{m/L}} \qquad \textbf{(13-11)}$$

سرعة الموجة في وتر

وهذه النتيجة تبدو معقولة اعتمادًا على ميكانيكا نيوتن. ونتوقّع أنّ الشدّ يكون في البسط والكتلة في المقام، لماذا؟ لأنّه عندما يكون الشدّ كبيرًا تكون السرعة أكبر، لأنّ أجزاء الوتر تكون على اتصال محكم بجيرانها، وكلما كانت الكتلة لكلّ وحدة طول أكبر كان القصور أكبر. وهكذا نتوقع سير الموجة ببطء أكبر.

المثال 11-11 **موجة في سلك**

تنتقل موجة طولها 0.30 m في سلك طوله 300 m، وكتلته الكلية 15 kg. فإذا كان السلك تحت تأثير شد 1000 N، فما سرعة هذه الموجة وترددها؟

النّهج: نفرض أنّ سرعة هذه الموجة في سلك تعطى (بالعلاقة 11-13). لذا، نحصل على التردد من (المعادلة 11-12)، $f = v/\lambda$.

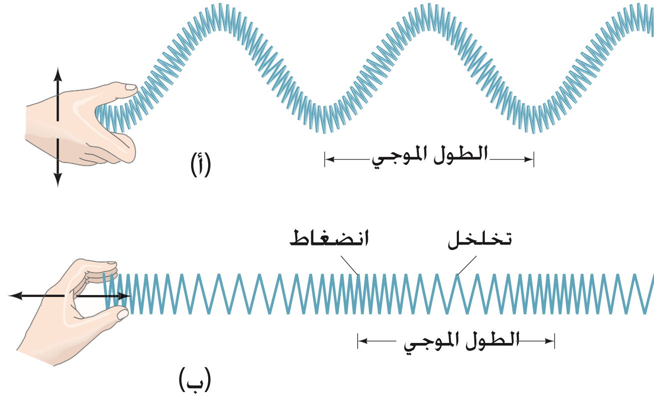
الحلّ: من (المعادلة 11-13)، السرعة هي

$$v = \sqrt{\frac{1000\,\text{N}}{(15\,\text{kg})/(300\,\text{m})}} = \sqrt{\frac{1000\,\text{N}}{(0.050\,\text{kg/m})}} = 140\,\text{m/s}.$$

والتردد هو

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{140\,\text{m/s}}{0.30\,\text{m}} = 470\,\text{Hz}.$$

ملحوظة: الشدّ الأكبر سوف يزيد كلًّا من السرعة والتردّد f، أما السلك الأسمك والأكثر كثافةً فسوف يقلّل v وكذلك f.



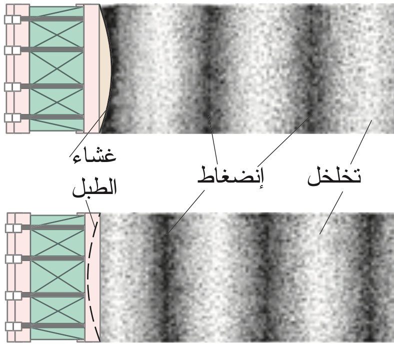
الشكل 11-24
(أ)موجة مستعرضة.
(ب)موجة طولية.

11-8 أنواع الموجات؛ مستعرضة وطولية

عندما تنتقل موجة في حبل- من اليسار إلى اليمين كما في (الشكل 11-21) – تهتز جُسيمات الحبل نحو الأعلى والأسفل باتّجاه مستعرض (عمودي) على حركة الموجة نفسها. مثل هذه الموجة تُدعى "موجة مستعرضة"، (الشكل 11-24أ). وهناك نوع آخر من الموجات يعرف بالموجة الطولية، والتي يكون فيها اهتزاز الجُسيمات في الوسط على امتداد اتّجاه انتقال الموجة. ويتم تشكيل موجات طولية في زنبرك مشدود بواسطة ضغط الزنبرك وتمدده بالتتابع، وهذا مبين في (الشكل 11-24 ب) ، ويمكن مقارنتها بالموجة المستعرضة في (الشكل 11-24 أ)، التي هي سلسلة من الانضغاطات والتخلخلات التي تنتقل على امتداد الزنبرك؛ فالتضاغطات هي المناطق التي تكون فيها الحلقات متقاربة لحظيًّا، أمّا التخلخلات فهي المناطق التي تكون فيها الحلقات متباعدة لحظيًّا. والتضاغطات والتخلخلات تقابل القمم والقيعان في الموجة المستعرضة.

الموجات المستعرضة والطولية.

وهناك مثالٌ مهمٌّ على الموجات الطولية، هو موجات الصوت في الهواء. فغشاء الطبل المهتز- مثلًا- يضغط ثم يخلخل بالتبادل طبقة الهواء الملامسة له، منتجًا موجةً طوليَّةً تنتقل بعيدًا في الهواء كما هو مبين في (الشكل 11-25) .

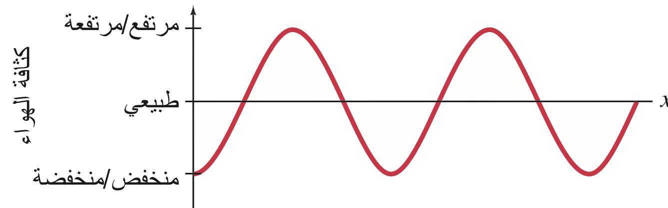


الشكل 11-25 إنتاج موجة صوتية- وهي طولية- مبينة في لحظتين خلال زمن بينهما حوالي نصف الزمن الدوري $(\frac{1}{2}T)$.

وكما في الموجات المستعرضة، فإنّ كلّ جزء من الوسط تنتقل فيه الموجة الطولية يتأرجح إلى مسافة قصيرة، إلّا أنّ الموجة ذاتها يمكن أن تنتقل إلى مسافات طويلة. إنّ طول الموجة، وترددها، وسرعتها كلها لها معانٍ في الموجات الطولية؛ فطول الموجة هو المسافة بين تضاغطين متتابعين (أو بين تخلخلين متتابعين)، في حين يشير التردد إلى عدد التضاغطات التي تعبر نقطة معينة في الثانية، أمّا سرعة الموجة فهي السرعة التي يبدو كلّ تضاغط متحركًا بها، وتساوي حاصل ضرب طول الموجة في التردد، $v = f\lambda$ (المعادلة 11-12).

يمكن تمثيل الموجة الطولية بالرسم عن طريق رسم كثافة جزيئات الهواء (أو حلقات الزنبرك) كدالة بالمكان عند لحظة معينة، كما هو مبين في (الشكل 11-26) . وهذا التمثيل بالرسم يسهل عرض ما يحدث. لاحظ أنّ الرسم يشبه الموجة المستعرضة.





الشكل 11-26
(أ)موجة طولية مع
(ب) تمثيلها بالرسم عند لحظة معينة.

سرعة الموجات الطولية

إنّ شكل سرعة الموجات الطولية يشبه شكل الموجات المستعرضة في الوتر (المعادلة 11-13).

$$v = \sqrt{\frac{\text{معامل المرونة}}{\text{معامل القصور}}}$$

وبشكلٍ خاص، للموجات الطولية التي تنتقل في قضيبٍ صلبٍ طويل

سرعة الموجة الطولية في قضيب صلب طويل.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(11-14أ)

حيث E معامل المرونة (البند 9-5) للمادة، و كثافتها. وللموجة الطولية المنتقلة في سائل أو غاز

سرعة الموجة الطولية في مائع.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

(11-14ب)

حيث B المعامل الجرمي (البند 9-5) و ρ هي الكثافة.

تطبيق الفيزياء
إدراك الحيوانات الحسي بالمكان باستخدام موجات الصوت.

المثال 11-12 موقع الصدى

يُعدّ تحديد موقع الصدى شكلًا من إدراك الجسّات، يستخدم من قِبَل بعض الحيوانات كالوطواط، وأسماك القرش ذات الأسنان، والدلافين. يطلق الحيوان نبضةً صوتيّةً (موجة طولية) تنعكس عن الاجسام، فيكشفها الحيوان. إنّ موجات تحديد الموقع بالصدى التي يطلقها سمك القرش (الشكل 11-27) لها تردّدات تقارب 200.000 Hz. (أ) ما طول موجة تحديد الموقع بالصدى للموجات التي يطلقها القرش؟ (ب) إذا كان هناك حاجز على بعد 100 m من القرش، فكم من الوقت يمضي بعد أن يطلق القرش الموجات، ومن ثم يكشف القرش عن انعكاسها؟

النّهج: نحسب أولًا سرعة الموجات الطوليّة (صوتية) في ماء البحر باستعمال (المعادلة 11-14ب)، (والجدولين 9-1 و 10-1) . طول الموجة $\lambda = v/f$.

الحلّ: (أ) سرعة الموجات الطوليّة في ماء البحر الأكثف قليلًا من الماء النقي هو

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.0 \times 10^9\ \text{N/m}^2}{1.025 \times 10^3\ \text{kg/m}^3}} = 1.40 \times 10^3\ \text{m/s}.$$

ثم باستعمال (المعادلة 11-12) ، نجد أنّ

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{(1.40 \times 10^3\ \text{m/s})}{(2.0 \times 10^5\ \text{Hz})} = 7.0\ \text{mm}.$$

(ب) الزمن اللازم للرحلة ذهابًا وإيابًا بين القرش والجسم هو

$$t = \frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}} = \frac{2(100\ \text{m})}{1.40 \times 10^3\ \text{m/s}} = 0.14\ \text{s}.$$

ملحوظة: سوف نرى لاحقًا أنّ الموجات تستطيع "التمييز" (أو الكشف) بين الأجسام فقط إذا كان طول الموجة مقاربًا لحجم الجسم أو أقلّ. وهكذا يستطيع القرش الكشف عن أجسام بحدود سنتيمتر أو أكبر.



الشكل 11-27 قرش له اسنان (المثال 11-12).

موجات أخرى

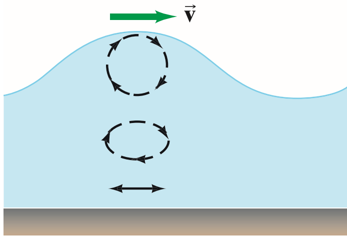
تطبيق الفيزياء
موجات الهزات الأرضيّة.

ينتج كلٌّ من الموجات المستعرضة والطولية عند حدوث الهزات الأرضيّة. وتُسمّى الموجاتُ المستعرضة التي تنتقل عبر الأرض موجات S (S تدل على مستعرض shear)، أمّا الموجات الطولية فتُدعى موجات P (P تدلّ على الضغط pressure)، أو موجات تضاغط. وتستطيع الموجات المستعرضة والطولية الانتقال عبر المواد الصلبة لأنّ الذرات والجزيئات يمكن أن تهتز حول مواضع اتزانها في أيّ اتجاه. ولكن في الموائع فقط، يمكن للموجات الطولية الانتقال؛ لأنّ أيّ حركة مستعرضة لا تؤثر بقوة إعادة بسبب أنّ المائع قابل لتغيير شكله. لقد استعملت هذه الحقيقة من قِبَل الجيوفيزيائيين لإثبات أنّ جزءًا من باطن الأرض يجب أن يكون سائلًا؛ يتمّ الكشف عن موجاتٍ طولية على امتداد قطر الأرض بعد الهزة الأرضيّة، ولكن لايتم الكشف عن موجاتٍ مستعرضة.

وإلى جانب هذين النوعين من الموجات، هناك موجات سطحيّة يمكنها الانتقال على الحد الفاصل بين مادتين؛ فالموجات على الماء هي في الواقع موجات سطحيّة تنتقل على الحد الفاصل بين الماء والهواء. وحركة كلّ جسيم من الماء عند السطح هي حركة دائرية أو إهليلجية (الشكل 11-28). لذلك، فهي تركيب من حركتين؛ الأولى مستعرضة والأخرى طولية. وهناك حركة موجية مستعرضة وطوليّة تحت السطح كذلك كما هو مبيّن. في القعر، تكون الحركة طولية فقط. وعندما تقترب الموجة من الشاطىء، يعاق الماء عند القعر ويبطىء، أما السطح فيتحرك متقدما بسرعة أكبر (الشكل 11-29) وينسكب فوق الحافة.

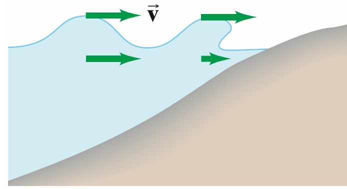
تحدث الموجات السطحية كذلك على الأرض عندما يحدث زلزال أو هزّة أرضيّة. والموجات التي تنتقل على السطح هي المسؤولة عن الدمار الذي تسببه الزلازل غالبا.

إنّ الموجات التي تتحرك على خطّ كما في الوتر المشدود ذات بعد واحد، أما الموجات السطحية كموجات الماء، (الشكل 11-20) ، فهي ذات بعدين. ولكن الموجات التي تنتشر من المصدر في اتجاهات الوسط جميعها كموجات الصوت الصادرة عن سماعة، أو موجات الزلازل خلال الأرض، موجات ثلاثية الأبعاد.



الشكل 11-28 موجة الماء هي مثال على موجة السطح، وهي عبارة عن تركيب من حركتين مستعرضة وطولية.

الشكل 11-29 كيف تتكسر الموجة؟ الأسهم الخضراء تمثل السرعة المكانية لجزيئات الماء.



11-9 الطاقة المنقولة بواسطة الموجات

تنقل الموجات الطاقة من مكان إلى آخر. وعند انتقال الموجات خلال الوسط، فإنّ الطاقة تنتقل بصورة طاقةٍ اهتزازيّةٍ من جُسيم إلى آخر من جُسيمات الوسط. وفي حالة موجة جيبية ذات تردّد f، تتحرك الجسيمات في SHM عند مرور الموجة. لذا، فكلُّ جُسيم يملك طاقة $E = \frac{1}{2}kA^2$، حيث A هو اتساع حركته، سواء مستعرضة أو طولية (انظر المعادلة 11-4 أ).

طاقة الموجة α (الاتساع)^2

وهكذا لدينا أهم نتيجة وهي أنّ: الطاقة المنقولة بواسطة الموجة تتناسب طرديًّا مع مربع الاتساع.

تعرف شدة الموجة I بأنها القدرة (الطاقة لكلّ وحدة زمن) المنقولة عبر وحدة المساحات العمودية على اتجاه انتقال الطاقة.

تعريف الشدة

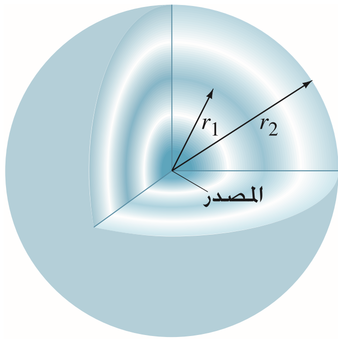
$$I = \frac{\text{الطاقة / الزمن}}{\text{المساحة}} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

الوحدة الدولية (SI) للشدة هي (W/m^2)، وبما أنّ الطاقة تتناسب مع مربع الاتساع، كذلك تكون الشدة I:

الشدة α (الاتساع)^2

$$I \propto A^2. \tag{15-11}$$

الشكل 11-30 موجة تنتشر في ثلاثة أبعاد من المصدر تكون كروية. القمم(التضاغطات) مبينة بنصفي قطرين هما: r_1 و r_2.



إذا انتشرت الموجة من المصدر في الاتجاهات جميعها، فهي موجةٌ ثلاثيّةُ الأبعاد. ومثال ذلك: الصوت الذي ينتشر في الهواء المفتوح، وموجات الزلازل، وموجات الضوء. وإذا كان الوسط متماثل الخصائص (نفسه في الاتجاهات كلّها) فالموجة كروية (الشكل 11-30). وعندما تنتقل الموجة إلى الخارج، فإنّ طاقتها تتوزع على مساحات أكبر وأكبر؛ لأنّ مساحة سطح الكرة تساوي (r نصف القطر) $4\pi r^2$

ولهذا، فإنّ شدة الموجة الكروية تساوي

$$I = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad [\text{موجة كروية}] \tag{16-11أ}$$

إذا كانت القدرة الناتجة من المصدر ثابتة، فإنّ الشدة تقلّ بما يتناسب مع مقلوب مربع البعد عن المصدر :

$$I \propto \frac{1}{r^2}. \tag{16-11ب}$$

$I \propto \frac{1}{r^2}$

الأصوات تكون أهدأ بعيدا عن المصدر.

إذا افترضنا نقطتين على بعد r_2 ، r_1 و من المصدر (الشكل 11-30) عندئذٍ $I_1 = P/4\pi r_1^2$ و $I_2 = P/4\pi r_2^2$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \tag{16-11جـ}$$

لذلك، إذا تضاعفت المسافة بحيث أن $(r_2/r_1 = 2)$ فإنّ الشدة تقلّ إلى الربع $I_2/I_1 = (\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$

يتناقص اتساع الموجة كذلك مع المسافة؛ لأنّ الشدّة تتناسب مع مربع الاتساع (المعادلة 11-15)، فالاتساع A يجب أن يقلّ مع $1/r$ بحيث $I \propto A^2$ سوف تتناسب مع $1/r^2$ (كما في المعادلة 11-16ب).

وهكذا $A \propto \frac{1}{r}$

فإذا افترضنا مسافتين r_1 ، r_2 عن المصدر فإنّ $\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2}$.

فإذا كانت الموجة على بعد يساوي مثلي بعدها الحالي عن المصدر، فإنّ الاتساع يكون نصف الاتساع الحالي، وهكذا (مع إهمال التضاؤل الناتج من الاحتكاك).

المثال 11-13 شدة الزلزال الأرضي

تساوي شدّة موجة الزلزال الأرضي P التي تنتقل عبر الأرض وتقاس على بعد 100 km من المصدر $1\times10^6\ \mathrm{W/m^2}$. ما شدة هذه الموجة إذا قيست على بعد 400 km من المصدر؟

النّهج: نفرض أنّ الموجة كرويّة. لذا، فإنّ الشدّة تقلّ مع مربع البعد عن المصدر.

الحلّ: عند 400 km، تكون المسافة أربعة أمثال المسافة 100 km. وعليه، فستكون الشدّة $\left(\frac{1}{4}\right)^2 = \left(\frac{1}{16}\right)$ من قيمتها عند 100 km، أو $(1.0\times10^6\ \mathrm{W/m^2})/16 = 6.3\times10^4\ \mathrm{W/m^2}$.

ملحوظة: باستعمال (المعادلة 11-16 جـ)مباشرة

$$I_2 = I_1 r_1^2/r_2^2 = (1.0\times10^6\ \mathrm{W/m^2})(100\ \mathrm{km})^2/(400\ \mathrm{km})^2 = 6.3\times10^4\ \mathrm{W/m^2}$$

يختلف الوضع في حالة الموجة ذات البعد الواحد، مثل موجة مستعرضة في وتر، أو موجة طولية تنتقل في قضيبٍ فلزيٍّ رفيع. بما أنّ المساحة تبقى ثابته، فإنّ الاتساع يبقى ثابتا أيضا (مع إهمال الاحتكاك). وبهذا، لا ينقص الاتساع والشدة مع المسافة.

في الواقع، الاضمحلال موجود بسبب الاحتكاك بشكل عام، وبعض الطاقة تتحول إلى طاقة حرارية. وبالتالي يقلّ اتساع الموجة وشدتها في بعد واحد مع البعد عن المصدر. وفي الموجة ذات الأبعاد الثلاثة، يكون النقص أكبر على الرّغم من أنّ الأثر يكون صغيرا عادة.

* 11-10 الشدة وعلاقتها مع السعة والتردد

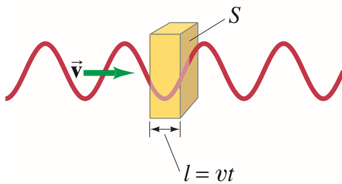
يمكن الحصول على علاقةٍ واضحةٍ بين الطاقة المحمولة في الموجة، أو شدّة الموجة I، واتساع الموجة وتردّدها. في الموجة الجيبة ذات التردد f، تتحرك الجسيمات في SHM عند مرور الموجة. لذا، فإنّ لكلّ جسيم طاقة حيث A الاتساع لحركته، سواء كانت الموجة مستعرضة أو طولية. وباستعمال (المعادلة 11-7 ب)، يمكن كتابة k بدلالة التردد $k = 4\pi^2 m f^2$، حيث m كتلة الجسيم (أو حجم صغير) من الوسط. وهكذا:

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2.$$

الكتلة $m = \rho V$، حيث ρ كثافة الوسط، و V حجم شريحة صغيرة من الوسط كما هو مبين في (الشكل 11-31). الحجم $V = Sl$ حيث S مساحة المقطع التي تنتقل الموجة خلالها. (استعملنا S بدلا من A للمساحة لأننا نستعمل A للاتساع). ويمكننا كتابة l المسافة التي تقطعها الموجة في زمن t بالصورة $l = vt$ ، حيث v سرعة الموجة. وهكذا $m = \rho V = \rho S l = \rho S v t$

$$E = 2\pi^2 \rho S v t f^2 A^2. \quad \text{(11-17أ)}$$

من هذه المعادلة، نرى أيضا النتيجة المهمة، وهي أنّ الطاقة المنقولة بالموجة تتناسب طرديًّا مع مربع الاتساع.



الشكل 11-31 حساب الطاقة التي تحملها الموجة المنتقلة بسرعة v.

والقدرة المنقولة $P = E/t$ هي

$$P = \frac{E}{t} = 2\pi^2 \rho S v f^2 A^2 \quad \text{(17-11ب)}$$

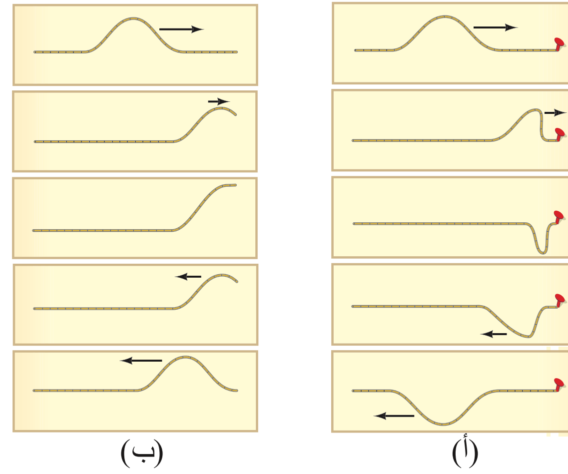
واخيرًا، فإنّ شدّة الموجة I هي القدرة المنقولة عبر وحدة مساحة عموديّة على اتّجاه انتقال الطاقة.

$$I = \frac{P}{S} = 2\pi^2 v \rho f^2 A^2 \quad \text{(18-11)}$$

وتبيّن هذه العلاقة بوضوح أنّ شدة الموجة تتناسب مع كلّ من مربع اتساع الموجة A عند أيّ نقطة ومربع التردد f.

11-11 انعكاس الموجات ونقلها

عندما تصطدم الموجة بحاجز، أو تصل إلى نهاية الوسط الذي تنتقل خلاله، فإنّ جزءًا منها سينعكس على الأقل. من الممكن أنّك شاهدت يومًا ما موجات الماء تنعكس عن صخرة أو جدار بركة سباحة. ومن الممكن كذلك أنّك سمعت صيحة انعكست من جرفٍ بعيد – وهذا ماندعوه "الصدى".

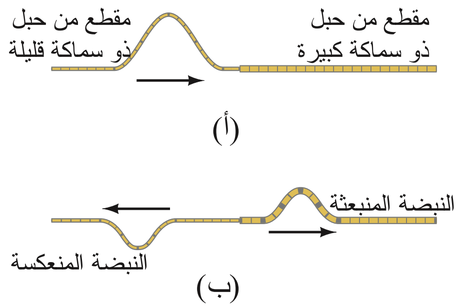


الشكل 11-32 انعكاس نبضة موجية في حبل ممدود على سطح طاولة. (أ) نهاية الحبل مثبته في وتد. (ب) نهاية الحبل حرة الحركة.

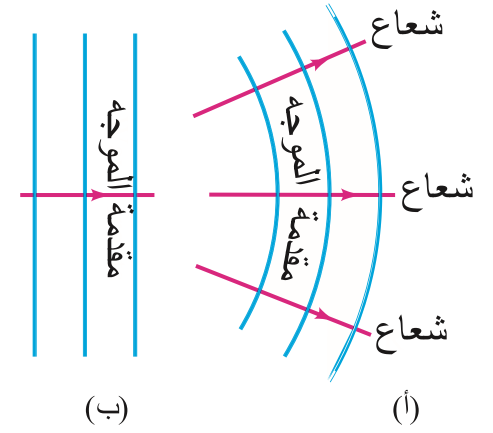
تنتقل نبضة موجية خلال حبل وتنعكس كما هو مبين في (الشكل 11-32) تنعكس النبضة مقلوبةً كما في (الشكل 11-32 أ)إذا كانت نهاية الحبل مثبتة، وتنعكس بالكيفية نفسها التي وصلت بها إذا كانت نهاية الحبل حرة الحركة كما في (الشكل 11-32 ب) . وعندما تكون النهاية مثبته، (الشكل 11-32 أ) ، فإنّ النبضة التي تصل النهاية المثبتة تؤثر بقوة (نحو الأعلى) في الدعامة. وتؤثر الدعامة بقوة مساوية ولكنها معاكسة نحو الأسفل على الحبل (قانون نيوتن الثالث). إنّ هذه القوة المعكوسة على الحبل هي التي "تولد" النبضة المنعكسة المقلوبة.

افترض نبضة تنتقل عبر حبل يتكوّن من جزءٍ خفيف، وجزءٍ آخر سميك كما في (الشكل 11-33). عند وصول النبضة إلى الحد الفاصل بين الجزأين، ينعكس جزء من النبضة ويرسل الجزء الثاني، كما هو مبين، فكلّما كان الجزء الثاني أثقل، كانت الطاقة المرسلة أقلّ. وعندما يكون الجزء الثاني جدارا أو دعامة صلبة، يرسل مقدارًا قليلًا جدًّا من الطاقة، في حين ينعكس معظمه كما في (الشكل 11-32 أ) . وفي حالة الموجة الدورية، فإنّ تردد الجزء المرسل (النافذ) من الموجة لا يتغير عند عبورها إلى الحدّ الفاصل؛ لأنّ نقطة الحدّ الفاصل تهتز بالتردد نفسه. وعليه، إذا كانت سرعة الموجة النافذه أقلّ، فهذا يعني أنّ طول الموجة أيضا أقصر $\lambda = v/f$.

الشكل 11-33 عندما تنتقل نبضة موجية نحو اليمين خلال حبل رفيع (أ) تصل إلى نقطة عدم اتصال حيث الحبل أكثر ثخانة وأثقل، عندها ينعكس جزء من الموجة ويرسل جزء آخر(ب).

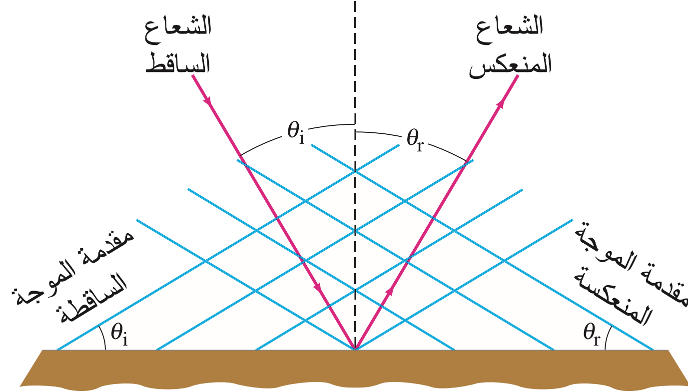


بالنسبة إلى موجةٍ ذات بعدين أو ثلاثة، مثل موجات الماء، فإنّنا معنيون بمقدمة الموجة، وهذا يعني النقاط كلّها على الموجة التي تشكل قمتها (تُدعى عادةً "موجة" على شاطيء البحر). إنّ الخطّ الموسوم باتجاه انتقال الموجة عموديًّا على مقدّمة الموجة يُسَمّى عادةً "شعاعًا" كما هو مبيّن في (الشكل 34-11). ومقدمات الموجات البعيدة عن المصدر تكون قد فقدت انحناءها كلّه تقريبًا. (الشكل 11-34 ب) وتكون مستقيمة تقريبا كذلك، كموجات المحيطات التي تسمى عندها موجات مستوية.



الشكل 11-34 تبين الأشعة اتجاه انتقال الموجات، وتكون دائما عمودية على مقدمات الموجات.
(أ)موجات دائرية أو كروية قريبة من المصدر.
(ب)تكون مقدمات الموجات مسطحة بعيدا عن المصدر، وتسمى موجات مستوية.

ولانعكاس موجاتٍ مستويةٍ ذات بعدين أو ثلاثة، كما في (الشكل 11-35) ، فإنّ الزاوية التي تصنعها الموجات القادمة أو الساقطة مع السطح العاكس تساوي الزاوية التي تصنعها الموجة المنعكسة. وهذا هو قانون الانعكاس الذي ينصّ على أنّ زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس. وتعرف زاوية السقوط على أنها الزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط مع العمود على سطح الانعكاس (أو مقدمة الموجة مع المماس للسطح). أمّا زاوية الانعكاس فهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والعمود المقام على السطح العاكس.



الشكل 11-35
قانون الأنعكاس

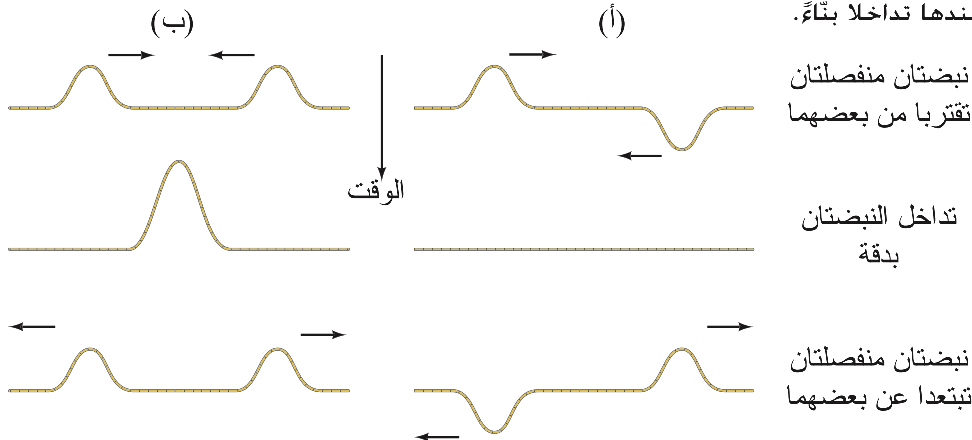
11-12 التداخل ؛ مبدأ التراكب

يُعزى التداخل إلى ما يحصل عندما تعبر موجتان منطقةً من الحيّز نفسه في الوقت ذاته. خذ مثلا انتقال النبضتين الموجيتين في خيط نحو بعضهما بعضًا في (الشكل 11-36) . وفي (الشكل 11-36 أ) ، نلاحظ أنّ اتساع النبضتين متساوٍ، إلا أنّ إحداهما قمّة، أما الأخرى فقاع؛ ولكن في (الشكل 11-36 ب) نجد أنّهما قمّتان. وفي كلتا الحالتين، تعبر الموجتان بجانب بعضهما بعد التقابل. وعلى أيّ حال، فإنّ الإزاحة المحصلة في المنطقة التي تتطابقان فيها تساوي المجموع الجبري لإزاحتيهما منفصلتين. (تعدّ القمة موجبةً في حين يعدّ القاع سالبا). وهذا ما يطلق عليه "مبدأ التراكب". في (الشكل11-36 أ) هناك إزاحتان متعاكستان للموجتين عند مرورهما أمام بعضهما، وتكون محصلتهما صفرًا، وتُعرف هذه النتيجة بالتداخل الهدّام. أما في (الشكل 11-36 ب)، وعند لحظة تطابق الموجتين، فإنهما تنتجان إزاحة محصلة أكبر من إزاحة كلّ منهما على حدة، وتسمى النتيجة عندها تداخلًا بنّاءً.

مبدأ التراكب

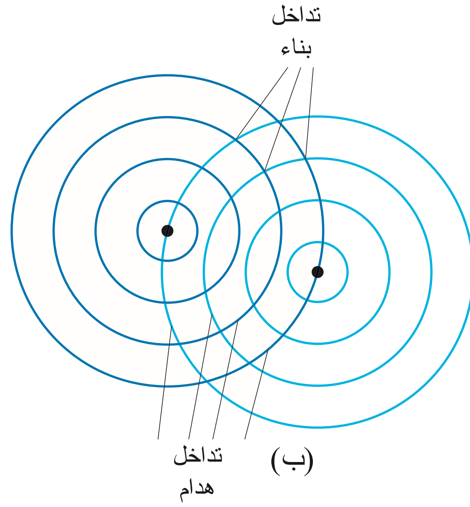
تداخل هدّام

تداخل بنّاء



الشكل 11-36 نبضتان موجيتان تعبران المنطقة نفسها. تتطابق الموجتان ويحدث التداخل: (أ) تداخل هدّام (ب) تداخل بنّاء.


(أ)



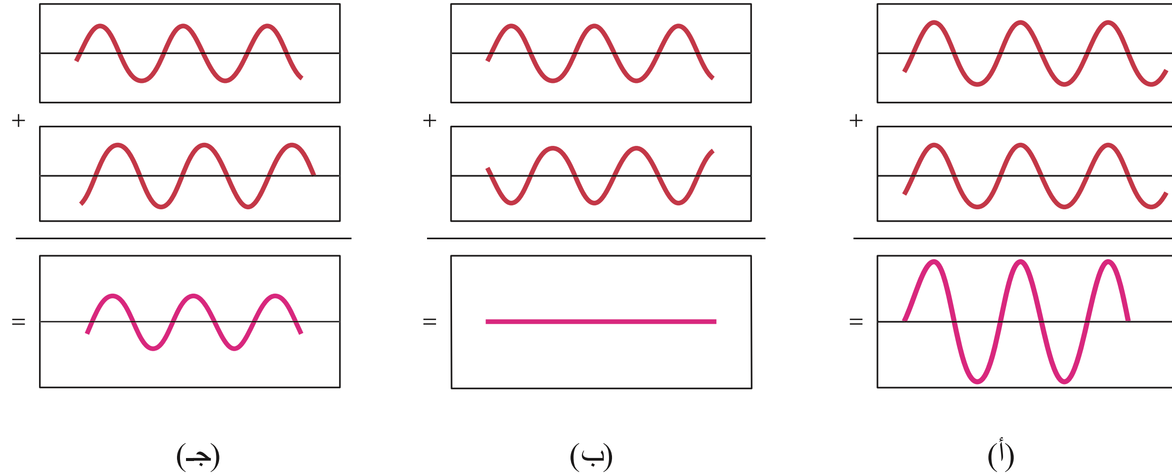
(ب)

الشكل 11-37 تداخل موجات الماء

عند إلقاء حجرين في بركة في آنٍ معًا، تتداخل مجموعتان من الموجات الدائريّة كما في (الشكل 37-11أ) . في بعض مناطق التطابق، تتقابل قمم الموجة الأولى مع قمم الموجة الثانية(وتلتقي القيعان ببعضها): انظر (الشكل 11-37 ب) . يحصل التداخل البنّاء عند هذه النقاط. ويهتز الماء نحو الأعلى والأسفل باتساع أكبر من اتساع الموجات منفصلة. وفي مناطق أخرى، يحصل تداخل هدّام حيث لا يتحرك الماء لا إلى الأعلى ولا إلى الأسفل ابدًا، حيث تتقابل قمّة موجةٍ مع قاع موجة أخرى، والعكس صحيح أيضا. يبين (الشكل 11-38 أ) إزاحة موجتين بالرسم كدالة بالزمن، وكذلك مجموعهما في حالة التداخل البنّاء. ولأيّ موجتين من هذا النوع، نستخدم تعبير "الطور" لوصف الوضعين النسبيين لقمتيهما، عندما تصطف القمم والقيعان كما هو مبين في (الشكل 11-38 أ) ، وللتداخل البناء، يقال إنّ الموجتين في الطور نفسه. وأما عند النقاط التي يحصل فيها تداخل هدام- انظر (الشكل 11-38 ب) – فتتقابل القمم من مجموعة موجات مع سلسلة من القيعان من الموجة الثانية، ويُقال عندئذٍ إنّ الموجتين خارج الطور بصورةٍ كاملة، وبصورةٍ أدق، إنّهما خارج الطور بمقدار نصف طول موجة؛ أي أنّ قمم مجموعة تتأخر بمقدار نصف موجة من قمم الموجة الثانية. ويأتي الطور النسبي لموجتي الماء في (الشكل 11-37) في وسط الحالتين السابقتين، وينتج بذلك تداخل هدّام جزئيّا كما في (الشكل 11-38جـ) . وإذا كان اتساع كلّ من الموجتين المتداخلتين غير متساو، فلا يحدث تداخل هدّام تام (كما في الشكل11-38ب).

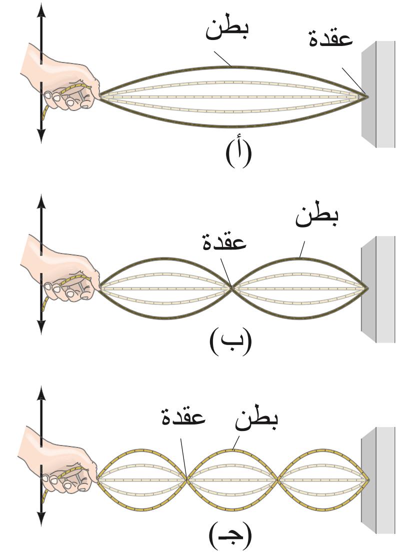
الطور

الشكل 11-38 تبين الرسومات موجتين ومجموعهما كدالة بالزمن عند ثلاثة مواقع، حيث تتداخل الموجتان تداخلا: (أ) بنّاءً. (ب) هدّاما. (جـ) هدّاما جزئيّا.



(أ) (ب) (جـ)

11-13 الموجات الموقوفة؛ الرنين



الشكل 11-39 الموجات الموقوفة تعود لثلاثة ترددات رنين.

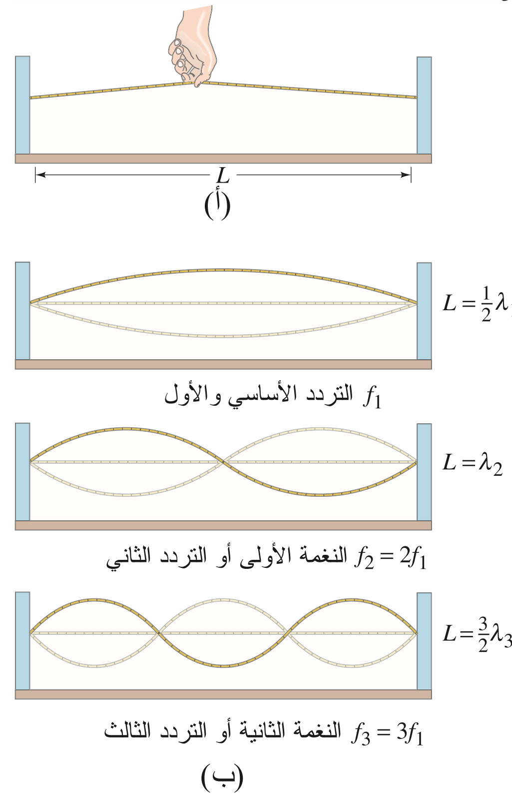
إذا هززت إحدى نهايتي وترٍ مع بقاء النهاية الأخرى ثابتةً، فإنّ موجةً متصلةً ستنتقل إلى النهاية الثابتة ثم تنعكس إلى الخلف، مقلوبةً كما رأينا في (الشكل 11-32 أ) . وعند تحريك الوتر بصورةٍ مستمرّةٍ، فستتحرك الموجات في كلا الاتجاهين، وسوف تتداخل الموجة المنتقلة في الوتر بعيدا عن يدك مع الموجة المنعكسة للخلف. وعادةً ما سيكون هناك مزيج. ولكن إذا هززت الوتر بالتردد المناسب، فإنّ الموجتين المنتقلتين ستتداخلان بطريقة تنتج موجة موقوفة ذات اتساع كبير، (الشكل 11-39) . وتسمى موجة "موقوفة" لأنّها تظهر وكأنّها لا تتحرك. يبدو في الوتر أجزاء تهتز إلى الأعلى والأسفل بنمط ثابت. وتُسَمّى نقاط التداخل الهدّام حيث يبقى الوتر ساكنًا في الأوقات جميعها "عقدًا". أمّا نقاط التداخل البناء حيث يهتز الوتر باقصى اتساع، فتسمى "بطونا". وتبقى العقد والبطون في أمكنة ثابته لتردد معين.

تحدث الموجات الموقوفة لأكثر من تردد. إنّ أقلّ تردد للحركة ينتج موجة موقوفة يعطي النمط المبين في (الشكل 11-39 أ) . والموجات الموقوفة المبينة في (الشكلين 11-39 ب و 11-39 ج) تنتج عند ضعف وثلاثة أضعاف التردد الأصغر، بفرض أنّ الشد في الوتر يبقى ثابتا. كما يمكن للوتر أن يهتز عند أربعة أمثال التردد الأصغر، وهكذا.

إنّ الترددات التي تنتج عندها الموجات الموقوفة هي الترددات الطبيعية، أو **ترددات الرنين** للوتر، وأنماط الموجات الموقوفة المبينة في (الشكل 11-39) هي أنماط اهتزازات رنين مختلفة. كما أنّ الموجة الموقوفة في الوتر هي نتيجة تداخل موجتين تسيران في اتجاهين متعاكسين. إضافةً إلى أنّ الموجة الموقوفة هي جسم يهتزّ في حالة رنين. تمثّل الموجات الموقوفة الظاهرة نفسها في رنين الزنبرك المهتزّ أو البندول، التي ناقشناها في (البند 11-6) . ولكن الفرق الوحيد هو أنّ للزنبرك أو البندول تردّد رنين واحدًا. أمّا الوتر، فله عددٌ لانهائي من ترددات الرنين، كلّ واحد منها عدد صحيح مضروبا في أصغر تردد رنين.

رنين الترددات

افترض خيطًا مشدودًا بين دعامتين حيث يضرب مثل خيط القيثارة أو الكمان، (الشكل 11-40 أ). سوف تنتقل موجات بترددات كثيرة متفاوتة بالاتجاهين على امتداد الخيط، ومن ثمّ تنعكس عند النهايتين، ثمّ تنطلق في الاتجاه المعاكس.



الشكل 11-40 (أ) خيط يُنقر (ب) الموجات الموقوفة التي تعود لترددات رنين مختلفة فقط هي التي ستدوم طويلا.

إنّ معظم هذه الموجات تتداخل معًا وتتلاشى. وعلى أيّ حال، فإنّ الموجات التي تنسجم مع ترددات رنين الخيط سوف تبقى. وستكون نهايتا الخيط عقدًا لأنّهما مثبتتان. كما سيكون هناك عُقَدًا أخرى أيضًا. بعض الموجات الموقوفة (أنماط اهتزازات الرنين) مبيّنة في (الشكل 11-40 ب) . وبشكل عام، فإنّ الحركة ستكون تركيبًا لموجات الرنين هذه، ولكن الترددات التي تنسجم مع ترددات الرنين سوف تبقى.

التردد الأساسي

ولتحديد ترددات الرنين؛ نلاحظ أولًا أنّ طول الموجات يرتبط بعلاقة بسيطة مع طول الخيط L. وينسجم أصغر تردد، "التردد الأساسي" مع بطن واحد (أو عروة). ويمكن مشاهدته في (الشكل 11-40 ب)، حيث يساوي طول الخيط كله نصف طول موجة. وهكذا $L = \frac{1}{2}\lambda_1$، حيث، 1λ طول الموجة ذات التردد الأساسي. وتُسَمّى الترددات الأخرى الطبيعية الحلات، وهي لوترٍ مهتزٍّ أعدادٌ صحيحةٌ مضروبةٌ في التردد الأساسي، وهي تُدعى توافقيات أيضًا. ويُسَمَّى التردد الأساسي النغمة الأولى*. الاهتزازة التالية بعد الأساسية لها عروتان وتُسَمّى النغمة الثانية (الحل الأول)، (الشكل 11-40 ب). إنّ طول الخيط L في النغمة الثانية يساوي طول موجة كاملة: $L = \lambda_2$. وللنغمتين الثالثة والرابعة $L = \frac{3}{2}\lambda_3$ و $L = 2\lambda_4$ على الترتيب، وهكذا. وبشكل عام يمكن أن نكتب

الحلات والتوافقيات

$$L = \frac{n\lambda_n}{2}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

يشير العدد الصحيح n إلى عدد التوافقيات: $n = 1$ للأساسي، $n = 2$ للثاني، $n = 3$ للثالث وهكذا. ونحلّ العلاقة لإيجاد λ_n

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(19-11أ)}$$

ولحساب تردد كلّ نغمة f؛ نستعمل (المعادلة 11-12) ، $f = v/\lambda$ لرؤية أنّ

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\frac{v}{2L} = nf_1, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(19-11ب)}$$

حيث $f_1 = v/\lambda = v/2L$ هو التردد الأساسي. ونلاحظ أنّ كلّ تردد رنين هو عدد صحيح مضروبا في التردد الأساسي.

ولأنّ الموجة الموقوفة تكافىء موجتين تسيران باتّجاهين متعاكسين، فإنّ مبدأ سرعة الموجة لا يزال مقبولا، ويعطى (بالعلاقة 11-13) بدلالة الشد F_T في الخيط، وكتلة وحدة الأطوال للخيط (m/L)؛ أي أنّ $v = \sqrt{F_T/(m/L)}$ للموجات المتحركة في كلا الاتّجاهين.

المثال 11-14 أوتار البيانو

وتر بيانو طوله $1.10\ \text{m}$، وكتلته $9.00\ \text{g}$: (أ) ما مقدار الشد الذي يخضع له بحيث يهتزّ بنغمةٍ أساسية ترددها $131\ \text{Hz}$؟ (ب) ما ترددات التوافقيات الأربع الأولى؟

النّهج: لحساب الشد؛ نحتاج إلى حساب سرعة الموجة باستعمال (المعادلة 11-12) $(v = \lambda f)$، ثم استعمال (المعادلة 11-13) لإيجاد F_T .

الحلّ: (أ) طول موجة التردد الأساسي $\lambda = 2L = 2.20\ \text{m}$ (المعادلة 11-19 أ حيث $n = 1$). سرعة الموجة في الوتر هي

$v = f\lambda = (2.20\ \text{m})(131 s^{-1}) = 288\ \text{m/s}$ ، ثم من (المعادلة 11-13)

$$F_T = \frac{m}{L}v^2 = \left(\frac{9.00 \times 10^{-3}\ \text{kg}}{1.10\ \text{m}}\right)(288\ \text{m/s})^2 = 679\ \text{N}.$$

(ب) الترددات؛ الثاني، والثالث، والرابع هي: اثنان، وثلاثة، وأربعة مضروبة في التردد الطبيعي 262,393, 524 Hz

ملحوظة: سرعة الموجة في الوتر ليست نفسها سرعة موجة الصوت الناتجة من الوتر في الهواء (كما سنرى في الفصل 12).

* التعبير "توافقي" جاء من الموسيقى، لأنّ هذه المضاعفات الصحيحة للتردّدات "تتناغم".

يمكن الحصول على موجاتٍ موقوفةٍ في كلِّ جسمٍ يُضرب وليس في الأوتار فقط، مثل غشاء الطبل، أو جسمٍ مصنوعٍ من الفلزات، أو الخشب. تعتمد ترددات الرنين على أبعاد الجسم؛ ففي الوتر تعتمد على طوله. أما الأجسام الكبيرة، فلها ترددات طبيعيّةٌ صغيرةٌ مقارنةً بالأجسام الصغيرة. في حين تعتمد الأدوات الموسيقية جميعها بدءًا بالآلات الوترية وانتهاءً بآلات النفخ الهوائية (يهتزُّ عمود الهواء فيها كموجةٍ موقوفة) والطبول، وآلات النقر على الموجات الموقوفة للحصول على أصواتها الموسيقيّة كما سنرى في (الفصل 12).

14-11 الانكسار*

عندما تصدم أيُّ موجةٍ حاجزًا، فإنّ بعضًا من الطاقة سينعكس وبعضها الآخر ينفذ أو يُمتص. وعندما تعبر موجة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد إلى وسط حيث سرعتها مختلفة، فإنّ الموجة النافذه قد تتحرك باتجاه مختلف عن اتجاه الموجة الساقطة كما هو مبين في (الشكل 11-41) . وتسمى هذه الظاهرة "الانكسار". ومثال ذلك موجة الماء، حيث تقل سرعتها في الماء الضحل وتتكسر كما في (الشكل 11-42)، أسفل. [عندما تتغير سرعة الموجة تدريجيًا، كما في (الشكل 11-42) دون فاصل حاد، فإنّ الموجات تغيّر اتجاهها تدريجيا. (تنكسر)].

في (الشكل 11-41) ، سرعة الموجة في الوسط 2 أقلّ من سرعتها في الوسط 1. في هذه الحالة، تنثني مقدمة الموجة فتسير أكثر قربًا من الحدّ الفاصل؛ أي أنّ زاوية الانكسار θ_r أقل من زاوية السقوط θ_i . لمعرفة هذا، ولإيجاد علاقة كمية بين θ_r و θ_i؛ دعنا نفكر في مقدمة موجة كصف من الجنود. فعند تقدمهم من أرض صلبة (الوسط 1) إلى أرض موحلة (الوسط2)، يتباطؤون عند الحد الفاصل، والجنود الذين يصلون إلى الوحل أولا يتباطؤون أولا، وينثني الصف كما في (الشكل 11-43 أ) .

دعنا نفترض مقدمة الموجة (أو صف الجنود) A في (الشكل 11-43 ب) . في الوقت نفسه t الذي تتحرك فيه A مسافة $l_1=v_1t$ ، نرى أنّ A_2 تتحرك مسافة $l_2=v_2t$. المثلثان قائما الزاوية في (الشكل 11-43ب) ، والمظللان باللونين الأخضر والأصفر لهما الضلع المشترك a. وهكذا

$$\sin\theta_1 = \frac{l_1}{a} = \frac{v_1 t}{a}$$

بما أنّ a هو الوتر، وأنّ

$$\sin\theta_2 = \frac{l_2}{a} = \frac{v_2 t}{a}$$

وبقسمة المعادلتين على بعضهما، فإننا نحصل على قانون الانكسار الآتي:

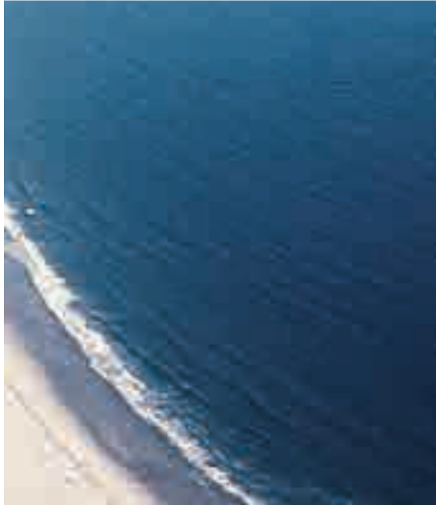
قانون الانكسار

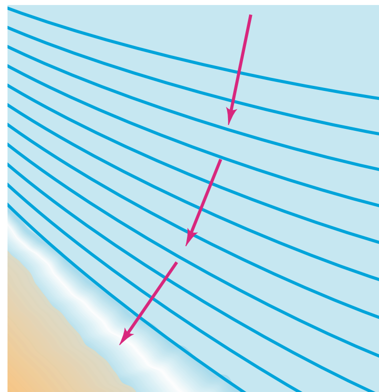
$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \qquad \textbf{(20-11)}$$

وبما أنّ θ_1 زاوية السقوط (θ_i) و θ_2 زاوية الانكسار (θ_r)، فإنّ (المعادلة 11-20) تعطي العلاقة الكمية بين الزاويتين.

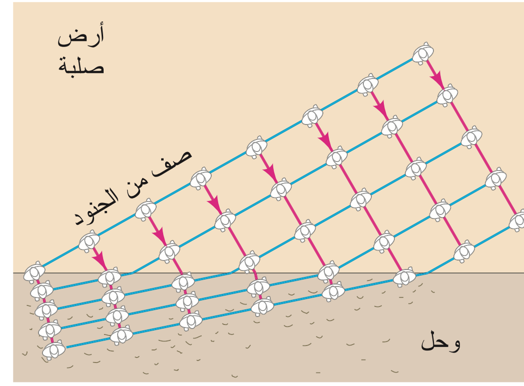
الشكل 11-41 انكسار الموجات التي تجتاز حدّا فاصلا.

* هذا البند والذي يليه يتم تغطيتهما بالتفصيل في (الفصلين 23 و25) في الضوء.

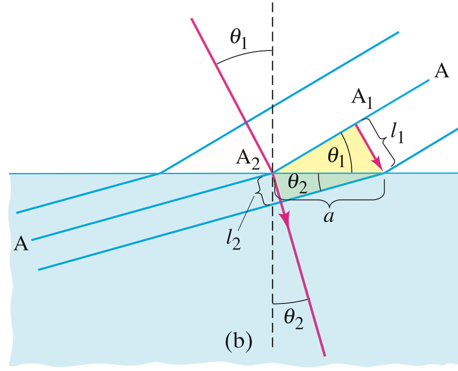




الشكل 11-42 تنكسر موجات الماء تدريجيا عند اقترابها من الشاطىء، عندما تقل سرعتها. ليس هناك حد فاصل محدد كما في (الشكل 11-41) لأنّ سرعة الموجات تتغير تدريجيا.



(أ)



(ب)

الشكل 11-43 (أ) اشتقاق تناظر مع حركة الجنود. (ب) قانون انكسار الموجات.

لو كانت الموجة تسير في الاتجاه المعاكس، لا تتغيّر هندسة الشكل، ولكن θ_1 و θ_2 تتبادلان الأدوار فقط. وسوف تصبح θ_1 زاوية الانكسار، وθ_2 زاوية السقوط. من الواضح عندها، إذا كانت الموجة تسير في وسط معين بشكل أسرع، فسوف تنثني بالاتجاه الآخر $\theta_r > \theta_i$. ونرى من (المعادلة 11-20) أنه إذا زادت السرعة تزداد الزاوية. والعكس صحيح.

تطبيق الفيزياء
انكسار الموجات الزلزالية.

تنكسر الموجات الزلزاليّة داخل الأرض عندما تنتقل في طبقات من الصخر ذات كثافاتٍ مختلفة (وبالتالي تختلف السرعة) تمامًا كما تفعل موجات الماء. وتنكسر موجات الضوء أيضًا. وعندما نناقش الضوء سوف نجد (المعادلة 11-20) مفيدة جدا.

المثال 11-15 انكسار موجة زلزالية

تمرُّ موجةٌ زلزاليّة P عبر حدٍّ فاصلٍ في الصخر، وتزداد سرعتها من 6.5 km/s إلى 8.0 km/s. إذا اصطدمت بهذا الفاصل بزاوية 30°، فما زاوية الانكسار؟

النهج: نطبق قانون الانكسار، (المعادلة 11-20).

الحل: بما أنّ $\sin 30^\circ = 0.50$، (المعادلة 11-20) تعطينا

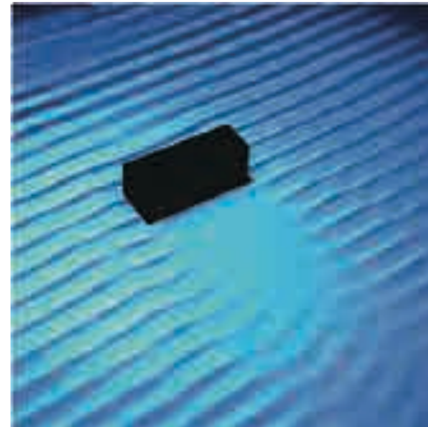
$$\sin\theta_2 = \frac{(8.0\ \text{m/s})}{(6.5\ \text{m/s})}(0.50) = 0.62.$$

وهكذا $\theta_2 = \sin^{-1}(0.62) = 38^\circ$

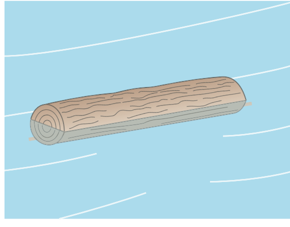
ملاحظة كن حذرًا مع زوايا السقوط والانكسار. كما ناقشنا في (البند 11-11، الشكل 11-35)، هاتان الزاويتان بين مقدمة الموجة والحدّ الفاصل، أو – بصورةٍ مكافئة – بين الشعاع (اتجاه حركة الموجة) والخط العمودي على الحدود. امعن النظر في (الشكل 11-43 ب).

11-15 الحيود

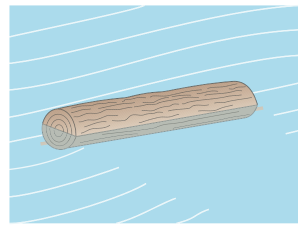
تنتشر الموجات في أثناء انتقالها. وعندما تصادف حاجزًا تنثني حوله قليلًا وتمرّ إلى المنطقة خلفه كما يبين (الشكل 11-44) لموجات الماء. هذه الظاهرة تُدعى "الحيود".



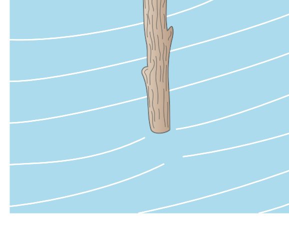
الشكل 11-44 حيود الموجات. الموجات تأتي من أعلى اليسار. لاحظ كيف تلتف الموجات – عند مرورها بحاجز – حوله إلى منطقة "الظل" خلفه.



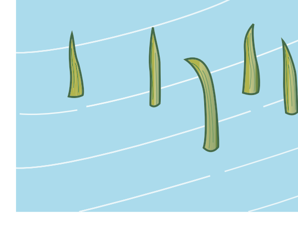
(د) موجات ذات أطوال موجية طويلة تعبر خلال جذع الشجرة



(جـ)موجات ذات أطوال موجية قصيرة تعبر خلال جذع الشجرة



(ب) عصا في الماء



(أ) موجات الماء تعبر خلال نصل أوراق الأعشاب

الشكل 11-45 تعبر موجات الماء أجسامًا بأحجامٍ مختلفة. لاحظ أنّه كلّما كان طول الموجة أكبر مقارنةً بحجم الجسم كان الحيود أكبر إلى داخل "منطقة الظل".

يعتمد مقدار الحيود على كلٍّ من طول الموجة وحجم الجسم (الحاجز) ، كما يبين (الشكل 11-45) . إذا كان طول الموجة أكبر بكثيرٍ من الجسم، كما في نصل أوراق الأعشاب، (الشكل 11-45 أ)، فإنّ الموجات تنحني خلالها كما لو لم تكن موجودة. وبالنسبة إلى الأجسام الأكبر، الفرعان (ب) و(جـ) هناك منطقة "ظل" أكبر خلف الحاجز، حيث قد لا نتوقع أن تخترقها الموجات– ولكنها تخترقها ولو قليلا. ثم لاحظ في الفرع (د) حيث لاحاجز كما في الفرع (جـ) لكن طول الموجة أكبر؛ أي أنّ هناك حيودًا أكبر إلى منطقة "الظل". وكقاعدة: فقط، إذا كان طول الموجة أصغر من حجم الجسم (الحاجز) فستكون هناك منطقة "ظل" مهمّة. هذه القاعدة تنطبق على الانعكاس من حاجز أيضًا. وقليل من الموجة سوف ينعكس، إلا إذا كان طول الموجة أصغر من حجم الحاجز.

وكدليل على الحيود؛ نستعمل الدليل التقريبي

$$\theta(\text{radians}) \approx \frac{\lambda}{L},$$

حيث θ زاوية انتشار الموجات بعد مرورها من فتحة عرضها L أو حول حاجز عرضه L.

تستطيع الموجات الالتفاف حول الحواجز، وبالتالي تنتقل الطاقة إلى مساحات خلف هذه الحواجز، وهذا يختلف كثيرًا عن الطاقة التي تحملها الجسيمات المادية. ومثال هذا: إذا كنت واقفًا خلف زاوية بناية، فلا يمكن أن تصيبك كرة بيسبول تُرمى من الجانب الآخر، ولكنّك تستطيع سماع صوت آخر؛ لأنّ موجات الصوت تحيد حول الزاويا.

المثال المفاهيمي 11-16 الهواتف المحمولة

تعمل الهواتف المحمولة بموجات الراديو بترددات تقارب 1 أو 2 جيجاهيرتز ($1G\text{ Hz} = 10^9\text{ Hz}$). إنّ هذه الموجات لا تخترق أجسامًا موصلةً للكهرباء، كجذوع الأشجار أو الصفائح الفلزيّة. وأفضل اتصالٍ يتمّ إذا كان هوائي الإرسال مرئيًّا من جهاز الاستقبال. على الرغم من أنّه يمكن إجراء محادثة هاتفية حتى لو كان البرج محجوبا بالأشجار، أو لو كان جهاز الاستقبال داخل سيارة، لماذا؟

الإجابة: إذا كان تردد موجات الراديو حوالي 2 GHz، وكانت سرعة الانتقال هي سرعة الضوء 3×10^8 m/s (البند 1-5)، عندها يكون طول الموجة

$$\lambda = v/f = (3\times10^8\text{ m/s})/(2\times10^9\text{Hz}) = 0.15\text{ m}$$

تستطيع الموجات أن تحيد عن حواجز قطرها 15 cm أو أقلّ.

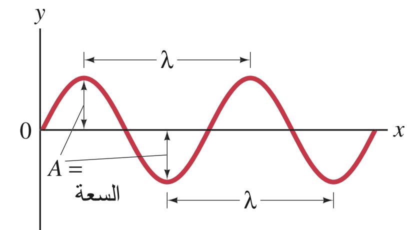
11-16 التمثيل الرياضي لموجة متحركة

إنّ موجةً بسيطةً بتردّدٍ منفرد، كما في (الشكل 11-46) هي موجة جيبيّة. وللتعبير عن هذه الموجة رياضيًّا؛ نفرض أنّ لها طول موجة λ وترددا f. وعند اللحظة التي تكون فيها $t = 0$، فإنّ شكل الموجة المبينة يكون

$$y = A\sin\frac{2\pi}{\lambda}x \qquad \textbf{(21-11)}$$

حيث y الإزاحة (سواء كانت طوليّةً أو مستعرضة) عند الموقع x، أمّا A فهو اتساع الموجة، وλ طول الموجة.

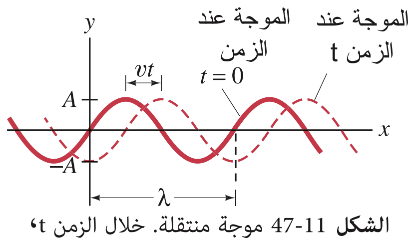
[المعادلة 11-21 تنطبق لأنّها تكرّر نفسها كلّ طول موجة. عندما: $x = \lambda$، فإنّ $y = \sin 2\pi = \sin 0$].



الشكل 11-46 خصائص الموجة ذات التردد الواحد عندما t=0 (تمامًا كما في الشكل 11-23).

افرض أنّ الموجة تتحرّك نحو اليمين بسرعة v . بعد زمن t، يتحرّك كلّ جزءٍ في الموجة (في الواقع كلّ "شكل" الموجة) نحو اليمين مسافة vt. يبين (الشكل 11-47) الموجة عند $t = 0$ كمنحنًى متصل، وبعد زمن t كمنحنًى متقطع. افرض أيّ نقطة على الموجة عند $t = 0$: وافرض أيضًا قمّةً عند الموقع x. بعد زمن t، تكون هذه القمة قد تحرّكت مسافة vt. لذا، فإنّ موقعها الجديد يبعد عن موقعها الأصلي مسافة vt. ولوصف النقطة نفسها على منحنى الموجة؛ فإنّ الحدّ بعد "sin" يجب أن يكون له القيمة العددية نفسها، لذلك نعوض بدلًا من x في (المعادلة 11-21)الحدّ $(x - vt)$:

$$y = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \quad (22\text{-}11)$$



الشكل 11-47 موجة متنقلة. خلال الزمن t، تتحرك الموجة مسافة vt.

1-D موجة تتحرك باتجاه x+.

أو بطريقةٍ أخرى، إذا كنت عند قمّة، فإنّه عند زيادة t يجب أن تزيد x بالمعدل نفسه بحيث يبقى $(x - vt)$ ثابتا.

أما الموجة المنتقلة على محور x نحواليسار، نحو تناقص قيم x, v تصبح $-v$، لذلك

1-D موجة تتحرك باتجاه x– (إلى اليسار)

$$y = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x + vt)\right]$$

ملخص

يعمل الجسم المهتزُّ حركةً توافقيّةً بسيطة SHM إذا كانت القوّة المعيدة تتناسب مع الإزاحة

$$F = -kx \quad \textbf{(1-11)}$$

وتُسَمّى أقصى إزاحة اتساعًا

أمّا الزمن الدوري T فهو الزمن اللازم لعمل دورةٍ كاملة (إلى الأمام والخلف)، في حين يشيرالتردد f إلى عدد الدورات في الثانية. والعلاقة بينهما هي

$$f = \frac{1}{T} \quad \textbf{(2-11)}$$

ويُعطى زمن الاهتزاز لكتلة m مربوطة في نهاية زنبرك بـ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \textbf{(7-11أ)}$$

SHM هي حركة جيبية، وهذا يعني أن الإزاحة كدالة في الزمن تتبع منحنى جيب أو جيب تمام.

خلال SHM، الطاقة الكلية

$$E = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2 \quad \textbf{(3-11)}$$

تتغيّر باستمرار من طاقة وضع إلى طاقة حركة، ومن طاقة حركة إلى طاقة وضع.

البندول البسيط بطول L يقترب من SHM. للاتساعات الصغيرة، يعطى الزمن الدوري بـ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad \textbf{(11-11أ)}$$

حيث g تسارع الجاذبية.

وعندما يكون الاحتكاك موجودًا (للزنبركات والبندولات الحقيقية جميعها) فالحركة مضمحلة . إنّ أقصى إزاحةٍ تتناقص مع الزمن، وبالتالي تتحول الطاقة أخيرًا إلى طاقة حرارية.

إذا أثرت قوة متأرجحة في نظام قادر على الاهتزاز ، فقد يكون اتساع الاهتزاز كبيرًا جدًّا إذا اتفق تردّد القوّة المؤثّرة مع التردّد الطبيعي (تردد الرنين) للمهتز، ويطلق على هذا الأثر الرنينُ.

تتصرف الأجسام المهتزّة كمصادر للموجات، وهي تنتشر بعيدًا عن المصدر. ومن أمثلة ذلك، الموجات في الماء وفي الخيط. قد تكون الموجة نبضة(قمة واحدة) أو متصلة (قمم وقيعان كثيرة). إنّ طول الموجة لموجة جيبية متصلة هو المسافة بين قمتين.

أمّا التردد، فهو عدد الأطوال الموجية التي تعبر نقطة معينة في وحدة الزمن.

إنّ اتساع الموجة هو أقصى ارتفاع للقمة، أو أعمق قاع نسبة إلى مستوى الاتزان.

سرعة الموجة (سرعة حركة القمة) تساوي حاصل ضرب طول الموجة في التردد.

$$v = \lambda f \quad \textbf{(12-11)}$$

في الموجة المستعرضة، تكون الاهتزازات عمودية على الاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة. ومثال ذلك موجة في خيط.

ولكن في الموجة الطولية، تكون الاهتزازات باتجاه انتقال الموجة؛ والصوت مثال على ذلك.

أمّا شدة الموجة، فهي الطاقة لكلّ وحدة زمن تحمل عبر وحدة مساحة (Watts/m^2). وللموجات ثلاثية الأبعاد التي تنتقل في الفضاء المفتوح، تقل شدة الموجة عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر

$$I \propto \frac{1}{r^2}. \quad \textbf{(16-11ب)}$$

[*تتناسب شدة الموجة طرديًا مع مربع كلّ من الاتساع والتردد.]

تنعكس الموجات عن الأشياء التي تعترض طريقها. وعندما تصطدم مقدمة الموجة (لموجة ثنائية أوثلاثية الأبعاد)، فإنّ زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس. وعندما تصطدم الموجة بحد فاصل بين مادتين، فسينعكس جزء من الموجة، أمّا الجزء الآخر فينفذ.

عندما تعبر موجتان الحيز نفسه وفي الوقت ذاته، فإنهما تتداخلان. الإزاحة المحصلة عند أيّ نقطة وفي اللحظة نفسها هي مجموع إزاحتي الموجتين منفصلتين؛ إنّ هذا قد ينتج تداخلا بنّاء، أو تداخلًا هدّامًا، أو شيئًا بينهما اعتمادا على الاتساعين وطوري الموجتين.

تتداخل الموجات المنتقلة في وترٍ طوله ثابتٌ مع الموجات التي انعكست عند نهايتي الوتر وتسيران في الاتجاه المعاكس. وعند ترددات معيّنه، يمكن إنتاج موجات موقوفة تبدو فيها الموجات ساكنة لا تتحرك. الوتر [أو أي وسط] يهتز بصورة كاملة. وهذه هي ظاهرة الرنين، والترددات التي تحدث عندها الموجات الموقوفة تُسَمَّى تردداتِ الرنين.

أمّا نقاط التداخل الهدّام (لا اهتزاز) فتُسَمّى عُقَدًا. في حين تُسَمَّى نقاطُ التداخل البناء (أقصى اتساع للاهتزاز) بطونًا. [*الموجات تغيّر الاتجاه، أو تنكسر عند انتقالها من وسطٍ إلى آخر، حيث تختلف سرعة الموجة فيهما. وتنتشر الموجات أيضًا أو تحيد عندما يعترض طريقها حواجز في أثناء انتقالها. هناك مؤشّرٌ تقريبي لمقدار الحيود هو $\theta \approx \lambda/L$، حيث λ طول موجة الضوء، وL عرض الفتحة أو الحاجز. وهناك منطقةٌ ملموسةٌ "منطقة الظل" فقط إذا كان طول الموجة λ أصغر من حجم الحاجز]

[* يمكن التعبير عن الموجة المنتقلة بصورة رياضية بـ $[y = A \sin\{(2\pi/\lambda)(x - vt)\}]$

أسئلة

1. اذكر بعض الأمثلة من الحياة اليومية على أجسام تهتزُّ. أيُّها يتحرّك SHM، على الأقلّ بالتقريب؟
2. هل يمكن لتسارع جسمٍ يهتزُّ حركةً توافقيّةً بسيطةً أن يساوي صفرًا؟ إذا كان كذلك، فأين؟
3. فسّر لماذا تكون حركةُ المكبس في محرّك السيّارة توافقيّةً بسيطةً تقريبًا؟
4. الزنبركات الحقيقيّة لها كتلة. هل سيكون الزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ الحقيقيّان أكبر أم أصغر من الكميّات المُعطاة بالمعادلات للنظام المثالي عديم الكتلة؟ فسّر.
5. كيف تستطيع مضاعفة السرعة القصوى لمهتزٍّ توافقيٍّ بسيط (SHO)؟
6. سمكة سلمون كتلتها 5.0 kg عُلّقت بطرف ميزان زنبركي عمودي، ثم أُفلتت. صف قراءة الميزان كدالة في الزمن.
7. إذا كانت ساعة بندول دقيقة عند مستوى سطح البحر، هل ستكسب زمنا عند أخذها إلى مكان مرتفع أم تفقده؟ لماذا؟
8. أرجوحةٌ مصنوعةٌ من دولاب معلّق في فرع شجرة ليصل إلى الأرض تقريبًا. (الشكل 11-48). كيف تستطيع أن تقيس بالتقريب ارتفاع فرع الشجرة باستعمال ساعة وقف فقط.



الشكل 11-48 (السؤال 8)

9. لماذا تستطيع أن تجعل الماء يتدفق جيئةً وذهابًا في صينيّة إذا هززت الصينيّة بتردّدٍ معيَّن؟
10. هاتِ عدّة أمثلةٍ على الرنين من الحياة اليوميّة.
11. هل تعدّ القعقعة في السيارة دائمًا ظاهرة رنين؟ فسّر.
12. هل تردّد موجةٍ دوريّةٍ بسيطةٍ يساوي تردُّدَ مصدرها؟ ماالسبب في حال كان الحلّ بالنفي أو الإيجاب؟
13. فسّر الفرق بين سرعة موجةٍ مستعرضةٍ تنتقل في وترٍ وسرعة قطعةٍ صغيرةٍ من الوتر.
14. لماذا تلف أسلاك حول الخيوط ذات التردّد المنخفض في البيانو عادة؟
15. ما نوع الموجات التي سوف تنتقل مع طول قضيبٍ فلزيٍّ أفقي، إذا ضربت عند نهايته (أ) عموديا من الأعلى؟ (ب) أفقيًّا موازيًا للطول؟
16. بما أنّ كثافة الهواء تقل مع زيادة درجة الحرارة، ولكن معامل المرونة الجرمي B تقريبا لا يعتمد على درجة الحرارة، فكيف نتوقع تغير سرعة الموجات الصوتية مع درجة الحرارة؟
17. اذكر سببين لتضاؤل اتساع موجات الماء الدائرية عندما تنتقل بعيدًا عن المصدر.
*18. موجتان خطيتان لهما الاتساع والسرعة نفساهما، وتتشابهان فيما عدا ذلك، غير أنّ إحداهما لها طول موجة نصف طول موجة الأخرى. أيهما تنقل طاقة أكثر؟ وبأيّ نسبة؟
19. لا يتغير التردد عندما تجتاز موجة جيبية الحد بين جزأين من حبل كما في (الشكل 11-33)، (أما السرعة وطول الموجة فيتغيران). فسر السبب.
20. إذا اهتزَّ وترٌ بثلاثة أجزاء، فهل هناك أيّ أمكنة يمكنك لمسها بحد السكين دون إزعاج الحركة؟
21. عندما تتكون موجة موقوفة في خيط، فإنّ اهتزازات الموجات الساقطة والمنعكسة تلغي بعضها بعضا عند العقد. هل يعني هذا أنّ الطاقة دمرت؟ فسر.
*22. إذا عرفنا أنّ الطاقة تنتقل من مكان إلى آخر، فكيف لنا أن نحدد الذي يحمل الطاقة؛ الجسيمات أم الموجات؟

1-11 إلى 3-11 حركة توافقية بسيطة

1. (I) إذا تحرّك جسمٌ حركةً توافقيّةً بسيطةً اتساعها 0.18 m، فما المسافة الكليّة التي يتحركها الجسم في زمنٍ دوري واحد؟

2. (I) وتر مرن طوله 65 cm عندما تعلق به وزنا مقداره 75 N، ويصبح طوله 85 cm عندما تعلق به وزنا مقداره 180 N. ما ثابت "الزنبرك" k لهذا الوتر؟

3. (I) تنضغط زنبركات سيارة كتلتها 1500 kg بـ 5.0 mm عندما يجلس سائقها (كتلته 68 kg) في مقعده. إذا مشت السيارة فوق (عائق) مطب، فماذا سيكون تردد الاهتزازات؟

4. (II) ميزان صياد سمك يمتد 3.6 cm عندما تعلق به سمكة كتلتها 2.7 kg: (أ) ما قيمة ثابت مرونة الزنبرك؟ (ب) ماذا سيكون اتساع الاهتزازة وترددها إذا سحبت السمكة نحو الأسفل 2.5 cm أخرى، ثم أفلتت لتهتز إلى الأعلى والأسفل؟

5. (II) وتر مرن يهتز بتردد 3.0 Hz عندما تعلق به كتلة 0.60 kg. ماذا سيكون تردده إذا علقت به كتلة 0.38 kg فقط؟

6. (II) صمّم جدولا تبين فيه الموقع x للكتلة في (الشكل 11-2)عند اللحظات الزمنية

$$t = 0, \tfrac{1}{4}T, \tfrac{1}{2}T, \tfrac{3}{4}T, T, \tfrac{5}{4}T$$

حيث T هو الزمن الدوري للاهتزازات. بيّن هذه النقاط الست على رسم بياني بين x و t. والآن، صل هذه النقاط بمنحنى أملس. اعتمادًا على هذه المعطيات البسيطة، هل يماثل المنحنى موجةً جيبية أو جيبا تمامية (الشكلان 11-8 أو 11-9)؟

7. (II) ذبابة كتلتها 0.25g، وقعت في شباك عنكبوت. يهتزُّ الشبك بتردد 4.0 Hz بصورة سائدة: (أ) ما قيمة ثابت صلابة الزنبرك k للشبكة؟ (ب) عند أيّ تردد تتوقع اهتزاز الشبكة إذا وقعت عليها حشرة كتلتها 0.50g.

8. (II) كتلة m عند نهاية زنبرك تهتزُّ بتردّد 0.88 Hz. إذا أضيفت كتلة 680g إلى m فإنّ التردد يصبح 0.60 Hz. فما قيمة الكتلة m؟

9. (II) كتلة 0.60 kg في نهاية زنبرك تهتزُّ 3.0 مرات في الثانية باتساع 0.13 m. احسب: (أ) السرعة عند مرورها بنقطة الاتزان. (ب) السرعة عندما تكون على بعد 0.10 m من الاتزان. (جـ) الطاقة الكلية للنظام. (د) المعادلة التي تصف حركة الكتلة، بفرض أنّ x كانت أكبر ما يمكن عندما t=0.

10. (II) عند أيّ إزاحة من الاتزان تكون سرعة SHO نصف أقصى قيمة؟

11. (II) كتلة مثبتة بطرف زنبرك امتدت مسافة x_0 من الاتزان ثم أفلتت. عند أيّ مسافة من الاتزان يكون تسارعها نصف أكبر قيمة له؟

12. (II) كتلة 2.62 kg تؤدي إلى استطالة زنبرك معلّق رأسيًّا 0.315 m. إذا امتدَّ الزنبرك 0.130 m مسافةً إضافيّةً ثمّ أُفلت. ما الزمن اللازم للوصول إلى موقع الاتزان (الجديد) مرة ثانية؟

13. (II) جسم كتلته 3.0 kg مثبت في نهاية زنبرك (ثابت مرونته k= 280 N/m) ويعمل حركة توافقية بسيطة. عندما يكون الجسم على بعد 0.020 m من موقع الاتزان، فإنّ سرعته تكون 0.55 m/s احسب: (أ) اتساع الحركة. (ب) أقصى سرعة يصل إليها الجسم. [مساعدة: استعمل قانون حفظ الطاقة].

14. (II) يلزم قوّة 80.0 N لضغط زنبرك لعبة بندقية 0.200 m لوضع كرة 0.180 kg. بأيّ سرعة سوف تغادر الكرةُ البندقيةَ؟

15. (II) كتلة موضوعة على سطحٍ أفقيٍّ أملس وموصولة بإحدى نهايتي زنبرك، ولكن النهاية الثانية مثبتة بجدار. يلزم 3.0 J من الشغل لضغط الزنبرك مسافة 0.12 m. إذا أفلتت الكتلة من السكون والزنبرك مضغوط، فإنّ الكتلة تكسب أكبر تسارع مقداره 15 m/s^2. جد قيمة: (أ) ثابت مرونة الزنبرك. (ب) الكتلة.

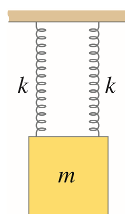
16. (II) كتلة 0.60 kg تهتز تبعا للمعادلة $x = 0.45\cos 6.40t$، حيث x بالمتر و t بالثانية. احسب (أ) الاتساع. (ب) التردد. (جـ) الطاقة الكليّة. (د) الطاقتان؛ الحركيّة والوضع عند x=0.30 m.

17. (II) عند أيّ إزاحة من موضع الاتزان تكون طاقة SHO نصفها KE والنصف الآخر PE؟

18. (II) إذا كانت طاقة إحدى الاهتزازات تعادل 7.0 أمثال طاقة الاهتزازة الأخرى، مع تساوي تردد كلّ منهما وكتلتيهما كذلك، فما النسبة بين اتساعيهما؟

19. (II) تهتز يقطينة كتلتها 2.00 kg معلقة بزنبرك خفيف عموديًّا مرّة كلّ 0.65 s: (أ) اكتب معادلة تبين موقع اليقطينة y (+ نحو الأعلى) كدالة مع الزمن t، على فرض أنها بدأت عندما كان الزنبرك مضغوطا 18 cm من موضع السكون ($y = 0$) وأفلتت.(ب) كم الزمن اللازم حتى تصل إلى موضع الاتزان لأول مرة؟ (جـ) كم ستكون سرعة اليقطينة القصوى؟ (د) كم سيكون أكبر تسارع لليقطينة؟ وأين ستصل اليقطينة لأول مرة؟

20. (II) قطعة كتلتها m معلقة بزنبركين متماثلين معلّقين رأسيًّا، كلّ زنبرك له ثابت مرونة k (الشكل11-49). ماذا سيكون تردد الاهتزاز؟



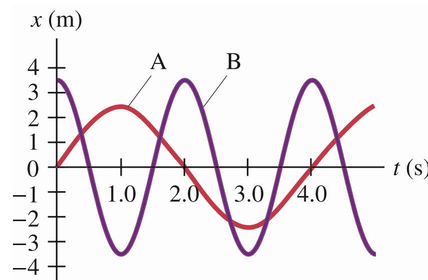
الشكل 11-49
(المسألة 20)

21. (II) تهتز كتلة 300g تبعا للمعادلة

$$x = 0.38 \sin 6.50\, t$$

حيث x بالمتر، t بالثانية. جد: (أ) الاتساع. (ب) التردد. (ج) الزمن الدوري. (د) الطاقة الكلية. (هـ) طاقتي الحركة والوضع عند x = 9.0 cm . وارسم رسما دقيقا لـ x , t مبينا الاتساع الصحيح والزمن الدوري.

22. (II) يبين (الشكل 11-50) مثالين على SHM، موسومين بِـــ A، و B. لكل منهما. ما هو: (أ) الاتساع. (ب) التردد. (ج) الزمن الدوري. واكتب المعادلتين لكلّ من A، وB في نمطٍ جيبيٍّ أو جيب تمامي.



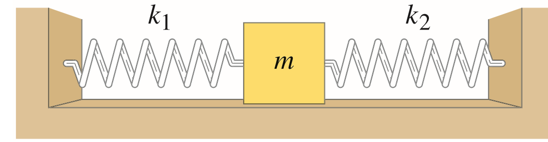
الشكل 11-50 (المسألة 22)

23. (II) عند $t = 0$، كتلة 755 g ساكنة عند نهاية زنبرك أفقي ($k = 124$ N/m) ضربت بمطرقة فأُعطيت سرعة ابتدائية 2.96 m/s. حدد قيمة: (أ) تردد الحركة وزمنها الدوري. (ب) الاتساع. (جـ) أكبر تسارع. (د) الموقع كدالة بالزمن. (هـ) الطاقة الكلية.

24. (II) زنبرك عمودي ثابت مرونته 305 N/m يهتز باتساع 28.0 cm عند تعليق 0.260 kg به. تمر الكتلة خلال موقع الاتزان ($y = 0$) بسرعة موجبة عند $t = 0$. (أ) ما المعادلة التي تصف هذه الحركة مع الزمن؟ (ب) عند أيّ لحظات زمنية سوف يكون الزنبرك في حالة أقصى وأدنى امتداد؟

25. (II) كتلة m موصولة بزنبركين ثابت مرونتهما k_1، و k_2 كما هو مبين في (الشكل 11-51) . أهمل الاحتكاك . بين أنّ الزمن الدوري يعطى بـ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}$$



الشكل 11-51 (المسألة 25)

26. (III) طلقة كتلتها 25.0 g تضرب قطعة كتلتها 0.600 kg مثبتة بزنبرك أفقي ثابت مرونته 7.70×10^3 N/m، بدأت القطعة بالاهتزاز باتساع 21.5 cm.كم كانت سرعة الطلقة قبيل اصطدامها بالقطعة إذا تحركت الطلقة والقطعة معا بعد التصادم؟

27. (III) يقفز شخص كتلته 65.0 kg من على جسر مرتفع. وعند وصوله إلى أدنى نقطة، فإنّه يهتز إلى الأعلى والأسفل ملامسًا نقطةً منخفضة 8 مرّات في 38.0 s. وأخيرًا يصل إلى السكون على عمق 25.0 m من مستوى الجسر. احسب معامل مرونة الزنبرك وطوله غير الممتد.

11-4 البندول البسيط

28. (I) يهتز بندول 36 اهتزازة في 60 s بالضبط. ما قيمة: (أ) الزمن الدوري؟ (ب) التردد؟

29. (I) ماذا يجب أن يكون طول بندول بسيط كي يعمل اهتزازة واحدة كلّ ثانيتين؟

30. (I) بندول الزمن الدوري له 0.80 s على سطح الأرض، ماذا سيكون زمنه الدوري على المريخ حيث تسارع الجاذبية نحو 0.37 من قيمته على الأرض؟

31. (II) ما قيمة الزمن الدوري لبندول بسيط طوله 80 cm (أ) على الأرض؟ (ب) عندما يكون في مصعد يسقط سقوطاً حراً؟

32. (II) طول بندول بسيط 0.760 m، كتلة كرة البندول 365 gram وأفلت عند زاوية 12.0^o مع العمودي. (أ) ما تردد اهتزازه؟ (ب) كم سرعة كرة البندول عندما تكون في أسفل مسارها؟ (جـ) ما الطاقة الكلية المختزنة في الاهتزازة، بفرض عدم وجود فقد للطاقة؟

33. (II) طول بندول ساعة جدك 0.9930 m. إذا كانت هذه الساعة تفقد نصف دقيقة في اليوم، فكيف تعدل طول بندولها لضبط الوقت الصحيح؟

34. (II) اشتقّ علاقة للسرعة القصوى v_{max} لكرة بندول بسيط بدلالة g، والطول L، وزاوية الأرجحة θ_0.

35. (III) بندول ساعة حائط يهتز بتردد 2.5 Hz. وعند $t = 0$ أفلت من حالة السكون ليبدأ عند زاوية 15^o مع العمودي. بإهمال الاحتكاك، ماذا سيكون موقع (الزاوية) البندول عند: (أ) $t = 0.25$ s؟ (ب) t =1.6 s؟ (ج) $t = 500$ s؟ [مساعدة: لا تخلط بين زاوية البندول والزاوية التي تظهر أمام cosine].

11-7، 11-8 الموجات

36. (I) لاحظ صيّاد سمكٍ أنّ قمّة الموجات تعبر قوس المرساة كلّ 3.0 s. ثمّ قاس المسافة بين قمتين فوجدها 6.5 m. فكم سرعة حركة الموجات؟

37. (I) موجة صوتية في الهواء ترددها 262 Hz وسرعتها 343 m/s. كم البعد بين قمم الموجات؟

38. (I) (أ) تتراوح ترددات موجات راديو بين 1600k Hz، و 550 kHz، وتنتقل بسرعة 3.00×10^8 m/s. احسب طول الموجة لكلّ من هذين الترددين (ب) في راديو FM، تتراوح ترددات الموجات بين 88.0M Hz، و 108M Hz (ميجاهيرتز) وتسير بالسرعة نفسها، ما أطوالها الموجية؟

*39. (I) احسب سرعة الموجات الطولية في: (أ) الماء. (ب) الغرانيت. (ج) الفولاذ.

*40. (II) قضيبان من مواد صلبة لهما معامل المرونة نفسه، إلا أنّ كثافة أحدهما ضعف كثافة الآخر. في أيٍّ منهما ستكون سرعة الموجات الطولية أكبر؟ وبأيّ نسبة؟

41. (II) وتر كتلته 0.65 kg ممدود بين دعامتين البعد بينهما 28 cm. إذا كان الشد في الوتر 150 N، فكم يلزم لنبضة لتسير من الدعامة الأولى إلى الأخرى؟

42. (II) قارب غندولا للتزلج موصول مع قمة جبل بواسطة كيبل (مجموعة أسلاك) فولاذي طوله 620 m وقطره 1.5 cm عندما يصل القارب إلى نهاية رحلته، يصدر نبضة موجية عبر الكيبل، لوحظ أنّ النبضة تحتاج إلى 16 s لترتد.(أ) ما سرعة النبضة الموجية؟ (ب) ما الشد في الكيبل؟

*43. (II) صدم بحّارٌ جانبَ قاربه عند نقطة تحت سطح الماء مباشرة، فسمع صدى الموجة المنعكس من قعر المحيط بعد 3.0 s. ما عمق المحيط عند هذه النقطة؟

44. (II). تسير الموجات الزلزاليّة P و S بسرعتين مختلفتين، وهذا الفرق يساعد في تحديد مركز الزلزال. (أ) بفرض سرعتين نموذجيتين 5.5 km/s و 8.5 km/s لموجتين P و S على الترتيب، على أيّ بعد حصل الزلزال إذا رصدت محطة لرصد الزلازل وصول الموجتين بفرق زمني 2.0 min؟

(ب) هل تكفي محطة واحدة لرصد الزلزال لتحديد مركز الزلزال؟ فسر.

45. (III) موجة سطحية ناتجة من زلزال أرضي يمكن تقريبها لموجة جيبية مستعرضة. بفرض تردد 0.50 Hz، ما الاتساع اللازم بحيث تبدأ الأجسام بفقد اتصالها بالأرض؟

(مساعدة: افرض أنّ التسارع a أكبر من g).

11-9 طاقة الموجة

46. (II) مانسبة الشدّة والاتساع لموجة زلزاليّة P تمرّ خلال الأرض، وتمّ الكشف عنها عند نقطتين على بعد 10 km و20 km من المصدر؟

47. (II) قيست شدّة موجةٍ زلزاليّةٍ تمرّ خلال الأرض فوجدت $2.0 \times 10^6\ J/m^2$ على بعد 48 km من المصدر. (أ) كم كانت شدّتها عندما مرّت بنقطةٍ على بعد 1.0 km فقط من المصدر؟ (ب) مامعدل مرور الطاقة في مساحة $5.0\ m^2$ وعلى بعد 1.0 km ؟

*11-10 الشدة وعلاقتها مع A، و f .

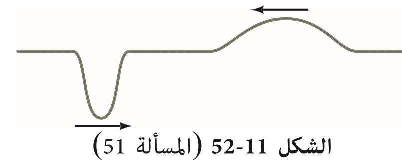
*48. (I) موجتان زلزاليتان لهما التردّد نفسه، تمرّان خلال الجزء ذاته من الأرض، ولكن إحداهما تحمل ضعف الطاقة التي تحملها الأخرى. ما النسبة بين كلّ من اتساع الموجتين؟

*49. (I) موجتان تنتقلان عبر خيط مشدود ولهما التردّد نفسه، إلا أنّ إحداهما تنقل قدرةً أكبر بثلاث مرات قدرة الأخرى. ما النسبة بين كلّ من اتساع الموجتين؟

*50. (II) لوحظ أنّ حشرةً صغيرةً على سطح بركةٍ تتحرّك نحو الأعلى والأسفل مسافة كلية 6.0 cm من أدنى نقطة إلى أعلى نقطة عند مرور موجة في سطح البركة. إذا نقصت الموجات إلى 4.5 cm، فبأيّ نسبةٍ تتغيّر الطاقة الحركيّة للحشرة؟

11-12 التداخل

51. (I) النبضتان في (الشكل 11-52) تتحركان نحو بعضهما. (أ) ارسم شكل الخيط عندما تتقابلان مباشرة.(ب) ارسم شكل الخيط بعد لحظات من ذلك (جـ) في (الشكل 11-36 أ) ، بعد مرور النبضتين عن بعضهما، يكون الخيط مستقيما. ماذا حدث للطاقة في هذه الحالة؟



الشكل 11-52 (المسألة 51)

11-13 الموجات الموقوفة؛الرنين

52. (I) يهتز وتر بتردده الطبيعي 440 Hz، فما ترددات التوافقيات الأربع الأولى؟

53. (I) وتر كمان (آلة موسيقية) يهتز بتردد 294 Hz دون وضع الأصبع عليه. ماذا يكون تردد اهتزازه إذا أثر فيه الأصبع عند ثلث طوله؟ (ثلثا طوله فقط سوف يهتز كموجة موقوفة).

54. (I) يهتزُّ وترٌ ما بأربع حلقات بتردد 280 Hz . اذكر ثلاثة ترددات على الأقل يعمل الوتر عندها رنينًا.

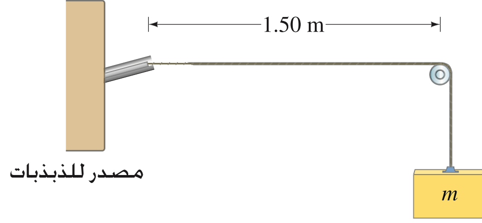
55. (II) سرعة موجات في وتر 92 m/s، إذا كان تردد الموجات الواقفة 475 Hz، فما البعد بين عقدتين متجاورتين؟

56. (II) إذا كان تردد نغمتين متتابعتين لوتر مهتز 280 Hz، و350 Hz، فما التردد الطبيعي للوتر؟

57. (II) وتر قيثارة طوله 90 cm وكتلته 3.6 g. المسافة من الجسر إلى الدعامة L=62 cm والشد في الوتر 520 N. فما التردد للنغمة الطبيعية وأول حلين؟

58. (II) وتر قيثارة يتوقع أن يهتز بتردد 200 Hz. ولكن بعد قياسه وجد أنه 205 Hz. فما النسبة المئوية للتغيّر في شدّ الوتر لتصحيح التردد؟

59. (II) إحدى نهايتي خيطٍ أفقيٍّ مثبتة إلى مصدر ذبذبات ميكانيكي يعطي 60 Hz، كتلة وحدة الأطوال للوتر تساوي 3.9×10^{-4} kg/m، يمر الخيط حول بكرة على بعد L=1.50 m وقد علقت أوزان في هذه النهاية، (الشكل 11-53). ما مقدار الكتلة m التي يجب تعليقها في هذه النهاية للحصول على: (أ) لفة واحدة؟ (ب) لفتين؟ (جـ) خمس لفات من الموجات الموقوفة؟ افرض أنّ نقطة اتصال الخيط بالمهتز هي عقدة، وهو في الواقع صحيح.



الشكل 11-53 (المسألتان 59 و 60)

60. (II) في (المسألة 59) ، يمكن تغيير طول الخيط بتحريك البكرة، إذا ثبتت الكتلة m عند 0.080 kg، فكم عدد أنماط الموجات الموقوفة التي يمكن الوصول إليها بتغيير L بين 10 cm، و 1.5 m؟

61. (II) عندما تخض الماء إلى الأمام والخلف في أنبوب بتردد صحيح، فإنّ الماء يرتفع وينخفض في كلّ من نهايتي الأنبوب ويبقى هادئا نسبيا في الوسط. افرض أنّ التردد للحصول على مثل هذه الموجة الموقوفة في أنبوب طوله 65 cm هو 0.85 Hz. فكم سرعة موجة الماء؟

*11-14 الانكسار

*62. (I) تنتقل موجة زلزاليّة P بسرعة 8.0 km/s وتصطدم بحاجز داخل الأرض بين نوعين من المادة. إذا اقتربت من الحدّ الفاصل بزاوية سقوط 47° وبزاوية انكسار 35°، فكم سرعتها في الوسط الثاني؟

*63. (I) تقترب موجات ماء من حاجز تحت الماء فتتغير سرعتها من 2.8 m/s إلى 2.1 m/s. إذا كانت قمة الموجة تعمل زاوية 34° مع الحاجز، فما مقدار زاوية الانكسار؟

*64. (II) تسير موجة صوتية في هواء دافىء تصطدم بطبقة هواء بارد وكثيف. إذا صدمت موجة الصوت الحدّ الفاصل البارد بزاوية 25°، فما مقدار زاوية الانكسار؟ افرض أنّ درجة حرارة الهواء البارد -10°C ودرجة حرارة الهواء الدافىء +10°C. ويمكن تقريب سرعة الصوت مع درجة الحرارة بـ $v = (331+60\ T)$ m/s، حيث T بالدرجات المئوية.

*65. (III) موجة زلزالية طولية تصدم حدّا فاصلًا بين نوعين من الصخور بزاوية 38°. وبعد أن تجتاز الموجة الحدّ الفاصل، يتغير الوزن النوعي للصخور من 3.6 إلى 2.8. احسب زاوية الانكسار على افتراض أنّ معامل المرونة للنوعين من الصخور ثابت.

*11-15 الحيود

*66. (II) صحن لاقط للأقمار الصناعية قطره 0.5 m. وحسب تعليمات التشغيل، يجب توجيه الصحن نحو القمر الصناعي، ولكن خطأً بمقدار 2° ممكن، ولا يؤثر في الاستقبال. احسب، بالتقريب، طول الموجة الكهرومغناطيسية التي يستقبلها اللاقط.

مسائل عامة

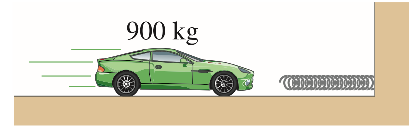
.67 طول موجة تسوماني 250 km وسرعتها 750 km/h عبرت المحيط الهادي. وعندما اقتربت من هاواي، لاحظ الناس هبوطا غير عادي في مستوى البحر في الخلجان. ما الزمن التقريبي اللازم لنجاتهم ؟

.68 ثابت المرونة لجهاز واقي الصدمات في سيارة هو 550 kN/m. جد أكبر انضغاط للزنبرك إذا اصطدمت سيارة كتلتها 1500 kg بجدار بسرعة 2.2 m/s. [مساعدة: استعمل قانون حفظ الطاقة.]

.69 قفز شخص كتلته 65 kg من شباك إلى شبكة نجاة من النار على ارتفاع 18 m منه، وتمتد الشبكة 1.1 m. افرض أنّ الشبكة تتصرف كزنبرك توافقي بسيط: (أ) احسب مقدار تمددها لو كان الشخص نفسه ممدداً فيها. (ب) كم التمدد المتوقع لها لو قفز الشخص من ارتفاع 35 m؟

.70 علقت كتلة m برفق بطرف زنبرك معلق رأسيًّا. تسقط الكتلة بعد ذلك مسافة 33 cm قبل أن تتوقف لحظيّا، ثم تبدأ بالارتفاع. ما تردد الاهتزاز؟

.71 سيارة كتلتها 950 kg تصدم زنبركا ضخما بسرعة 22 m/s (الشكل 11-54) وتضغط الزنبرك 5.0 m: (أ) ما ثابت مرونة الزنبرك؟ (ب) ما الزمن الذي تستغرقه السيارة في حالة تماس مع الزنبرك قبل أن ترتد إلى الخلف؟



الشكل 11-54 (المسألة 71)

.72 عندما تسير وأنت تحمل فنجان قهوة (قطره 8 cm) بسرعة السير نفسها؛ أي خطوة لكلّ ثانية. تتأرجح القهوة أكثر وأكثر، واخيرا تنسكب فوق الحافة (الشكل 11-55). احسب، بالتقريب، سرعة الموجات في القهوة.



الشكل 11-55 (المسألة 72).

.73 الموجات في أخدود على بعد 10.8 cm من مركز قرص تسجيل فونوغراف يدور بمعدل 33-rpm طولها 1.70 mm. ماذا سيكون تردد الصوت المنبعث؟

.74 كتلة 2.00 kg تهتّز تبعًا للمعادلة x=0.650 cos 7.40 t ، حيث x بالأمتار، و t بالثواني. احسب ما يلي: (أ) الاتساع. (ب) التردد. (ج) الطاقة الكلية. (د) طاقتي الحركة والوضع عند x=0.260 m.

.75 يهتز بندول بسيط بتردد f. ماذا سيكون تردده لو تسارع بـ 0.50 g (أ) نحو الأعلى؟ (ب) نحو الأسفل؟

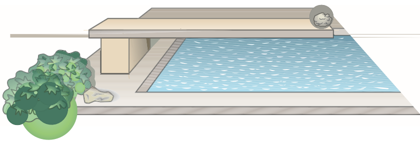
.76 قارب خشبي كتلته 220 kg يطفو في بحيرة. عندما يقف عليه رجل كتلته 75 kg فإنه يغطس 4.0 cm أعمق في الماء. وعندما يترجَّل، يهتز القارب قليلاً. (أ) ما هو تردد الاهتزاز؟ (ب) ما الطاقة الكلية للاهتزاز؟ (أهمل التضاؤل).

.77 وتران في آلة موسيقية مهيئان للعزف بـ 392 Hz و 440 Hz (أ) ما تردد أول حلين لهذين الوترين؟ (ب) إذا كان للوترين الطول والشدّ نفساهما، فما النسبة بين كتلتهما؟ (جـ) إذا كانت كتلة وحدة الأطوال للوترين متساوية ولهما الشد نفسه، فما النسبة بين طوليهما؟ (د) إذا تساوى كلّ من الكتلة والطول لهما، فما النسبة التي يجب أن تكون بين شديهما؟

.78 افترض موجة جيبية تنتقل عبر الوتر المشدود والمكون من جزأين (الشكل 11-33). احسب صيغة رياضية للنسبة بين: (أ) سرعة الموجة في الجزء الثقيل إلى الجزء الخفيف v_H/v_L، (ب) طول الموجتين في الجزأين (لماذا التردد في الجزأين هو نفسه؟). (جـ) في أيّ جزء من الوتر يكون طول الموجة أكبر؛ الثقيل أم الخفيف؟

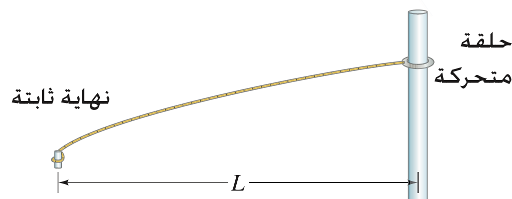
.79 شوكة رنّانة تهتزّ بتردّد 264 Hz وقمّة كلّ فرع تتحرك 1.8 mm إلى جانبي مركزها. احسب ما يلي: (أ) السرعة القصوى. (ب) أقصى تسارع لقمة الفرع.

.80 لوحة غوص تهتز حركة توافقية بسيطة بتردد 1.5 دورة في الثانية. ما أقصى اتساع يمكن أن تهتز به نهاية اللوحة بحيث إنّ كومة حصى (الشكل 11-56) موضوعة عند النهاية لا تفقد اتصالها بها خلال الاهتزاز؟



الشكل 11-56 (المسألة 80)

.81 يمكن أن تكون نهاية خيط "حرة" إذا ربطت هذه النهاية بحلقة يمكنها الانزلاق دون احتكاك على عمود (الشكل 11-57). حدّد الأطوال الموجية لاهتزازات الرنين لمثل هذا الخيط بحيث تكون إحدى نهايتيه حرة والأخرى ثابتة.



الشكل 11-57 (المسألة 81).

82. بندول "الثواني" له زمنٌ دوريٌّ على 2.000 s بالضبط، يستغرق كلّ تأرجح باتجاه واحد 1.000 s تماما. (أ) ما طول مثل هذا البندول في أوستن، تكساس حيث $g = 9.793\ m/s^2$؟ (ب) إذا نقل هذا البندول إلى باريس حيث $g = 9.809\ m/s^2$ ، فكم ملم يجب أن نزيد طول البندول؟ (جـ) ماذا يجب أن يكون طول هذا البندول على القمر، حيث $g=1.62\ m/s^2$؟

83. كتلة معلقة بزنبرك يمكنها أن تهتزّ بالاتجاه الرأسي، أو أن تتأرجح كالبندول البسيط باتساعات صغيرة، ولكن لا يحدثان في الوقت نفسه. أيهما أطول؛ الزمن الدوري للاهتزازات العمودية أم الاهتزازات الأفقية، وبأيّ مقدار؟ [مساعدة: افرض أنّ l_0 هو طول الزنبرك غير الممتد، وL طوله عندما تكون الكتلة معلقه به في حالة سكون].

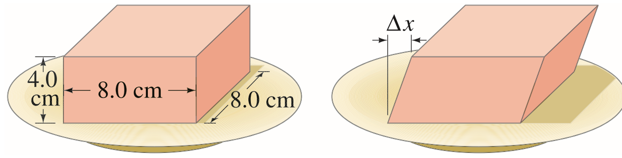
84. جسم كتلته $M=5.0\ kg$ يستند إلى طاولة ملساء ومثبت بزنبرك أفقي ($k\ =130\ N/m$) بجدار بجسم آخر كتلته $m=1.25\ kg$ موضوع فوق M. معامل الاحتكاك السكوني بين الكتلتين يساوي 30. ما أكبر اتساع للاهتزاز بحيث لا تنزلق m عن M؟

85. سلك طوله 10.0 m، وكتلته 123 g، استطال تحت تأثير شدّ يساوي 255 N. تكوّنت نبضة عند إحدى نهايتيه، وبعد 20.0 ms تكوّنت نبضة ثانية عند نهايته الأخرى. أين ستتقابل النبضتان؟

86. جسم كتلته M معلق من سقف بزنبرك مرونته k. وضعت قطعة نقود كتلتها m فوق M. ما أكبر اتساع للاهتزاز بحيث تبقى m فوق M؟ (افرض أنّ $m \ll M$).

87. رفعت سيارة كتلتها 1200 kg في ساحة الخردة. طول الكيبل الفولاذي للرافعة 22 m وقطره 6.4 mm. هبت رياح أدّت إلى تأرجح السيارة في نهاية الكيبل. ما الزمن الدوري للأرجحة؟ (مساعدة: ارجع إلى الجدول 9-1).

88. قطعة (جيلو) موضوعة في صحن كما في (الشكل 11-58) الذي يعطي أبعاد قطعة الجيلو أيضا). تدفع جانبا كما هو مبين ثم تترك. ترتد قطعة الجيلو ثم تبدأ بالاهتزاز بصورة مشابهة لنظام الكتلة والزنبرك. احسب، بالتقريب، تردد هذا الاهتزاز علما أنّ معامل القصّ (البند 9-5) للجيلو هو $520\ N/m^2$ وكثافته $1300\ kg/m^3$.



الشكل 11-58 (المسألة 88).

إجابات التمارين

أ: (أ)، (جـ)، (د)

ب: (أ) يزداد (ب) يزداد (جـ) يزداد.

جـ: فارغ

د: (أ) 25 cm ؛ (ب) 2.0 s.

إذا كانت الموسيقى غذاء الفيزياء، فاعزفها. (انظر شكسبير، الليلة الثانية عشرة، السطر1). تحتوي (الأوركسترا) على آلاتٍ وتريّةٍ يعتمد صوتها على الموجات الموقوفة المستعرضة في الأوتار، وتحتوي كذلك على آلات هوائية (نفخ) ينشأ صوتها من أمواج موقوفة طولية لعمود هوائي. أمّا آلات النقر، فتولّد موجاتٍ موقوفة أكثر تعقيدًا. وإلى جانب اختبار مصادر الصوت، سندرس تدريج الديسيبل لمستوى الصوت، واستجابة الأذن، وتداخل موجات الصوت، والضربات، وظاهرة دوبلر، وموجات الصدمة، والهدير (الدّوي) الصوتي، والتصوير فوق الصوتي.



الفصل 12

الصّـوت

يرتبط الصوت بحاستنا السمعيّة؛ أي، بوظيفة آذاننا وسلوك أدمغتنا التي تفسّر المؤثّرات الحسيّة التي تصل إلى آذاننا. كما يعود تعبير" الصوت" أيضًا إلى المؤثّر الفيزيائي الذي يحفز آذاننا؛ أي، الموجات الطولية.

ونستطيع أن نميز ثلاثة جوانب لأيّ صوت: أولا، يجب أن يكون هناك مصدر للصوت، وكأي موجة، فمصدر الموجة الصوتية هو جسم مهتز. ثانيا، تنتقل الطاقة من المصدر على صورة موجات صوتية طولية. ثالثا، يكشف عن الصوت بواسطة الأذن أو مكبر الصوت (الميكروفون). وفي هذا الفصل، سنتناول بعض سمات الموجات الصوتية ذاتها.

1-12 خصائص الصّوت

رأينا في الفصل 11، (الشكل 11-25)، كيف ينتج غشاء الطبل المهتز موجة صوتية في الهواء؛ لأنّ اهتزازات الهواء عادة هي التي ترغم طبلات آذاننا على الاهتزاز. ولكن موجات الصوت أيضًا تستطيع الانتقال في المواد الأخرى.

إذا ضُرب حجران معًا تحت سطح الماء، فيمكن لسابح سماع الصوت تحت السطح؛ لأنّ الاهتزازات تحمل إلى الأذن بواسطة الماء. وإذا وضعت أذنك على الأرض مباشرة ، فإنّك تستطيع سماع أيّ قطار يقترب أو شاحنة، على الرغم من أنّ الأرض لم تلامس طبلة أذنك. في هذه الحالة، تسمى الموجات الطولية المنقولة بواسطة الأرض أيضًا موجات صوتية؛ لأنّ اهتزازاتها تؤدي إلى اهتزاز الأذن الخارجية والهواء داخلها أيضا. ومن الواضح أنّ الصوت لا يستطيع الانتقال دون وجود وسط ناقل. فمثلًا، لا يمكن سماع صوت جرس يقرع داخل ناقوس مفرغ ، كما أنّ الصوت لا يستطيع الانتقال عبر الفراغ في الفضاء الخارجي.

إنّ سرعة الصوت تختلف باختلاف المواد؛ ففي الهواء عند درجة $0°C$ و $1 atm$، يسير الصوت بسرعة $331\ m/s$. سرعة الصوت في أوساط مختلفة مبينة في (الجدول 12-1)، حيث تعتمد هذه القيم إلى حدٍّ ما على درجة الحرارة، وخاصة للغازات. فمثلاً، في الهواء قريبًا من درجة حرارة الغرفة، تزداد السرعة تقريبًا $0.60\ m/s$ لكلّ زيادة درجة مئوية واحدة.

$$v \approx (331 + 0.60T)\ m/s$$

حيث T درجة الحرارة بـ °C. وإن لم يذكر خلاف ذلك، فسوف نفرض في هذا الفصل أنّ $T = 20°C$، لذلك $v = [331 + (0.60)(20)]\ m/s = 343\ m/s$.

جدول 12-1 سرعة الصوت في عدة مواد (20°C and 1 atm)

المادة	السرعة (m/s)
الهواء	343
الهواء (0°C)	331
الهيليوم	1005
الهيدروجين	1300
الماء	1440
ماء البحر	1560
الحديد و الفولاذ	≈5000
الزجاج	≈4500
المنيوم	≈5100
الخشب الثقيل الصلب	≈4000
أسمنت	≈3000

سرعة الصوت في الهواء

تطبيق الفيزياء

كم يبعد موقع حدوث البرق؟

المثال المفاهيمي 12-1 البعد عن ومضة برق

هناك قاعدة أساسية تخبرنا عن بعد منطقة تفريغ البرق عنّا "، إنّها ميل واحد لكلّ خمس ثوان قبل سماع صوت الرعد". ويعزى ذلك إلى أنّ سرعة الضوء كبيرة جدّا $(3 \times 10^8\ m/s)$ حوالي مليون مرة أسرع من الصوت). لذا، فالزمن اللازم لوصول الضوء يكون مهملا مقارنة مع الزمن اللازم للصوت.

الإجابة: تبلغ سرعة الصوت في الهواء حوالي $340\ m/s$؛ وعليه فإنه لقطع مسافة $1\ km = 1000\ m$ يستغرق الصوت حوالي ثلاث ثوان، أي أنّ الزمن اللازم للرعد لقطع مسافة ميل واحد هو $(1.6)(3) \approx 5\ sec$.

التمرين أ: ماذا ستكون القاعدة التجريبية (للمثال 12-1) لو أخذنا المسافة بالكيلومترات؟

هناك ميزتان للصوت تبرزان فورا لكلّ سامع بشري هما: "العلو" و "درجة الصوت أو طبقته": فكلّ منهما يعود إلى المؤثر الحسي في السامع. إلا أنّ لكلّ من هذين المؤثّرين الموضوعيين كمية فيزيائية يمكن قياسها. يرتبط (**ارتفاع**) الصوت بالشدة (الطاقة لكلّ وحدة زمن تعبر وحدة المساحات) والموجة الصوتية، التي سنناقشها في الجزء التالي.

ارتفاع الصوت

أما درجة (**طبقة**) الصوت فتعود إلى: هل هي عالية كصوت الكمان أو الناي الصغيرة، أم منخفضة كصوت الطبل الكبير. إنّ الكمية الفيزيائية التي تحدد درجة الصوت هي التردد، كما لاحظها جاليليو أولًا. كلّما كان التردد أقلّ كانت الدرجة أخفض، وكلما كان التردد مرتفعًا كانت الدرجة أعلى*. وتعدّ أفضل أذن إنسان تستجيب للترددات هي التي تتراوح بين $20\ Hz$ إلى حوالي $20{,}000\ Hz$.

درجة (طبقة) الصوت

(تذكر أنّ $1\ Hz = 1\ cycle/s$). يسمى هذا المدى من الترددات"**المدى السمعي**". وهذه الحدود تتفاوت من شخص إلى آخر. ولكن هناك اتّجاه عام واحد وهو أنه مع تقدم عمر الإنسان، فإنه يصبح غير قادر على سماع الترددات العالية؛ لذلك ينخفض الحد العالي للتردد إلى $10{,}000\ Hz$ أو أقلّ.

مدى التردد السمعيّ

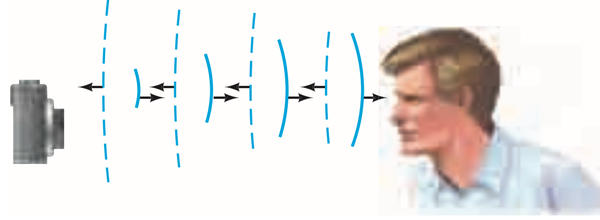
إنّ الموجات الصوتية التي تقع تردداتها خارج المدى السمعي قد تصل الأذن، ولكننا لا نشعر بها عادة. وتسمى الموجاتُ التي في حدود $20{,}000\ Hz$ فوقَ السمعية (ميّز هذا من فائق الصوت الذي يعني أنّ شيئا يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الصوت). وهناك كثير من الحيوانات قد تسمع الترددات العالية؛ فالكلاب مثلا تستطيع سماع حتى $50{,}000\ Hz$، والوطواط يستطيع الكشف عن ترددات تصل إلى $100{,}000\ Hz$.

تنويه:

لا تخلط بين فوق السمعية (تردد عالي) مع الفائقة السرعة (سوبر سونيك)

إنّ الموجات فوق السمعية لها تطبيقاتٌ كثيرةٌ في مجال الطب ومجالات أخرى كذلك، وهذا ما سنناقشه لاحقًا في هذا الفصل.

* رغم أن درجة الصوت تتحدد بواسطة التردد بصورة رئيسية، لكنها تعتمد قليلًا على علوّ الصوت، فمثلاً، الصوت العالي جدًا يبدو ذو درجة منخفضة عن الصوت الهادي.



الشكل 12-1 (مثال 12-2). تطلق الكاميرا(آلة التصوير) ذاتية التبئير نبضة فوق صوتية. تبين الخطوط المتصلة مقدمات الموجات المنتشرة نحو اليمين، في حين تمثل الخطوط المتقطعة مقومات الموجات المنعكسة عن وجه الشخص، والتي تعود إلى الكاميرا. وتسمح المعلومات الزمنية لهذه الآلة أن تضبط العدسة على المسافة الصحيحة.

تطبيق الفيزياء
تعديل البؤرة ذاتيّا.

المثال 12-2 تعديل البؤرة ذاتيا بالموجات الصوتية

تطلق الكاميرات التي تعدّل البؤرة ذاتيًّا نبضةً صوتيّة ذات تردّدٍ عالٍ (فوق صوتية) تنتقل إلى الجسم المراد تصويره، وتحتوي على مجسٍّ يكشف عن الموجات الصوتية الراجعة. احسب زمن الانتقال لنبضة عن جسم يبعد: (أ) 1.0 m. (ب) 20 m.

النّهج: إذا افترضنا أنّ درجة الحرارة 20°C تقريبًا، فإنّ سرعة الصوت ستكون حوالي 343 m/s. وباستعمال هذه السرعة والمسافة الكلية d للذهاب والإياب في كلّ حالة، يمكننا حساب الزمن $(v = d/t)$

الحلّ: (أ) تسير النبضة 1.0 m إلى الجسم، ومن ثم 1.0 m للعودة؛ أي أنّ المسافة الكلية 2.0 m. ونحلّ لإيجاد t، حيث $v = d/t$:

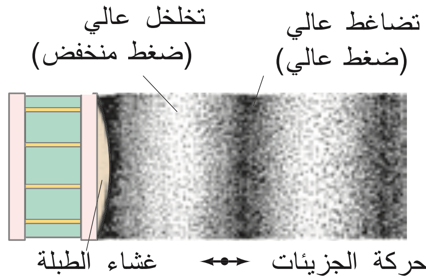
$$t = \frac{d}{v} = \frac{2.0\ \text{m}}{343\ \text{m/s}} = 0.0058\ \text{s} = 5.8\ \text{ms}$$

(ب) المسافة الكلية الآن $2 \times 20\ \text{m} = 40\ \text{m}$ لذلك

$$t = \frac{40\ \text{m}}{343\ \text{m/s}} = 0.12\ \text{s} = 120\ \text{ms}$$

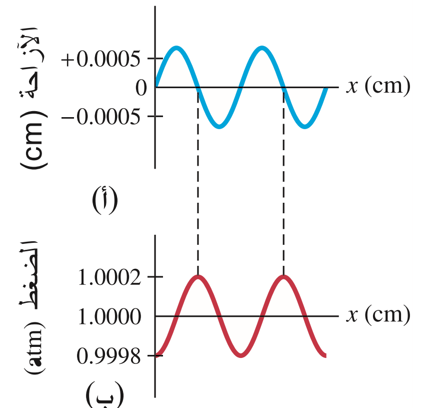
ملحوظة: هذه الفترات الزمنية قليلة جدّا؛ لذلك فإنّ الانتظار لضبط الكاميرا ليس ملحوظًا

تُسَمّى الموجاتُ الصوتيّةُ التي تقع تردّداتها دون المدى السمعي (أي أقلّ من 20 Hz) **تحت سمعية** (infrasonic). وتتضمّن مصادر الموجات تحت السمعيّة الزلازل الأرضية، والرّعد، والبراكين، والموجات الناجمة من الآلات الضخمة المهتزّة. والمصدر الأخير هذا قد يكون مزعجًا للعاملين؛ لأنّ هذه الموجات تحت الصوتية- قد تكون غير مسموعة- قد تسبب التلف لجسم الإنسان. إنّ هذه الموجات منخفضة التردد تعمل بطريقة الرنين، مسببة حركة وأذى لأعضاء الجسم.



الشكل 12-2 عندما يهتز غشاء الطبل، يضغط الهواء بالتتابع، وعندما يعود إلى الخلف يترك تخلخلا أو تمددا في الهواء. (انظر الشكل 11-25)

الشكل 12-3 تمثيل موجة صوتية في الفراغ عند لحظة معينة بدلالة: (أ) الإزاحة. (ب) الضغط.



في العادة، نصف موجة صوتية بدلالة اهتزاز جزيئات الوسط الذي تنتقل فيه؛ أي بدلالة حركة الجزيئات أو إزاحتها. ولكن الموجات الصوتية يمكن تحليلها أيضًا من منظور الضغط. وفي الواقع، فإنّ الموجات الطولية تُسَمّى أحيانًا موجاتِ الضغط. ويمكن قياس تغير الضغط عادةً على نحوٍ أسهل من قياس الإزاحة. يبين (الشكل 12-2) في " **موجة التضاغط**" (حيث الجزيئات متقاربة)، أنّ الضغط أعلى من المعتاد، أمّا في التمدد (التخلخل) فالضغط أقلّ من المعتاد. ويوضح (الشكل 12-3) تمثيلا بالرسم لموجة صوتية في الهواء بدلالة (أ) الإزاحة. (ب) الضغط. لاحظ أنّ موجة الضغط: عندما يكون الضغط قيمة عظمى أو دنيا، تكون الإزاحة عن موضع الاتزان صفرا؛ وحيث تغير الضغط يكون صفرا، فإنّ الإزاحة تكون نهاية عظمى أو صغرى.

2-12 شدة الصوت : الديسيبل

ارتفاع الصوت

يُعدُّ ارتفاع (علو) الصوت مؤثّرًا حسيًّا في ضمير السامع مثل الطبقة (الدرجة). وترتبط كذلك بكميّةٍ فيزيائية قابلة للقياس هي **شدّة الموجة**. تُعرّف الشدّة بأنّها الطاقة المنقولة بواسطة الموجة في وحدة الزمن عبر وحدة مساحات عمودية على اتجاه تدفق الطاقة. وكما رأينا في الفصل 11، فإنّ الشدة تتناسب مع مربع اتساع الموجة. ووحدات الشدة هي وحدات القدرة لكلّ وحدة مساحة، أو (W/m^2).

تطبيق الفيزياء
مدى واسع من سمع الإنسان

تستطيع أذنُ الإنسان كشف أصواتٍ ذات شدّةٍ منخفضةٍ قد تصل إلى $10^{-12}\ W/m^2$، وكذلك أصوات ذات شدّة عالية $1\ W/m^2$ (وربّما أعلى، وهي ضارة إذا كانت أكثر من هذا). إنّ هذا مدى واسع من الشدّة يصل إلى نسبة 10^{12} بين الأعلى والأدنى. وبسبب هذا المدى الواسع، فمن المحتمل أنّ ما نفهمه على أنه علو الصوت لا يتناسب طرديًا مع الشدة. ولإنتاج صوت يبدو أنه أعلى بمقدار الضعف؛ يلزمنا موجة صوتية شدتها أكبر بعشر مرّات. وهذا ينطبق بالتقريب على أيّ مستوى للصوت لترددات حول منتصف المدى السمعي. فمثلًا، يبدو صوت موجة صوتية شدتها $10^{-2}\ W/m^2$ للإنسان العادي ضعف موجة شدتها $10^{-3}\ W/m^2$، وأربعة أمثال موجة شدتها $10^{-4}\ W/m^2$.

مستوى الصوت

وحدة dB

بسبب هذه العلاقة بين الإحساس الموضوعي لارتفاع الصوت من جهة، والكمية الفيزيائية القابلة للقياس "الشدة" من جهة أخرى، فإنّ مستويات شدة الصوت تقاس عادة على تدريج لوغاريتمي. ووحدة هذا التدريج هي "**بل**"؛ نسبة الى مكتشفها الكسندر جراهام بل. وبعمومية أكثر "**ديسيبل**" (dB)، ويساوي $\frac{1}{10}$ bel (10 dB = 1 bel)، مستوى الصوت، β، لأيّ صوت يعرف بدلالة شدته، I، مثل

مستوى الصوت (ديسيبل)

$$\beta\ (\text{in dB}) = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad \textbf{(1-12)}$$

حيث I_0 شدة مرجع اختياري، واللوغاريتم للأساس 10. تؤخذ عادةً أدنى شدة سمعية للأذن الجيدة "عتبة السمع"، وهي $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$. فمثلًا، مستوى الصوت الذي شدته $I = 1.0 \times 10^{-10}\ W/m^2$ سيكون:

تنويه:
$0\ dB$ لاتعني شدة تساوي صفرا.

$$\beta = 10 \log\left(\frac{1.0 \times 10^{-10}\ W/m^2}{1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2}\right) = 10 \log 100 = 20\ dB$$

كل $10\ dB$ تكافىء تغير مقداره 10 مرات تغير في الشدة

لأنّ $\log 100 = 2.0$. لاحظ أنّ مستوى الصوت عند العتبة هو 0 dB؛ أي أن $\beta = 10 \log 10^{-12}/10^{-12} = 10 \log 1 = 0$ لأنّ $\log 1 = 0$. لاحظ أيضا أنّ زيادة الشدة بنسبة تساوي 10 تمثل مستوى صوت $10\ dB$. أما زيادة الشدة بنسبة 100 فتعني زيادة مستوى صوت 20 dB. وهكذا حيث 50 dB يعني 100 مرة أكبر من صوت 30 dB، وهكذا.

الشدة ومستوى الصوت لعدد من الأصوات المعروفة توجد في الجدول 2-12.

الجدول 2-12 الشدة لأصوات مختلفة

مصدر الصوت	مستوى الصوت (dB)	شدة الصوت (W/m^2)
طائرة نفاثة على بعد 30 m	140	100
عتبة الألم	120	1
موسيقى صاخبة	120	1
صفارة على بعد 30 m	100	1×10^{-2}
سيارة مسرعة 90 km/h	75	3×10^{-5}
مواصلات عامة	70	1×10^{-5}
حديث على بعد 50 cm	65	3×10^{-6}
صوت مذياع هادىء	40	1×10^{-8}
همس	20	1×10^{-10}
حفيف أشجار	10	1×10^{-11}
عتبة السمع	0	1×10^{-12}

المثال 3-12 شدة الصوت في الطريق العام

عند ناحية شارع مكتظ بالمارة، يكون مستوى الصوت 70 dB. ما شدة الصوت هناك؟

النّهج: علينا حلّ (المعادلة 12 - 1)لإيجاد الشدة I، ونتذكر أنّ $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$.

الحلّ: من (المعادلة 12-1)

لذلك

$$\log \frac{I}{I_0} = \frac{\beta}{10}$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\beta/10}$$

لكن $\beta = 70$

$$I = I_0 10^{\beta/10} = (1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2)(10^7) = 1.0 \times 10^{-5}\ W/m^2$$

ملحوظة: تذكر (ملحق) $x = \log y$ هي نفسها $y = 10^x$.

تطبيق الفيزياء
استجابة السماعة (± 3 dB)

المثال 12-4 استجابة السماعة

تنتج سمّاعةٌ ذاتُ نوعيّةٍ جيّدةٍ تردّداتٍ تتراوح بين 30 Hz و 18,000 Hz بمستوى صوتٍ منتظم ± 3 dB. أي أنّ مستوى الصوت الناتج لا يتغير بأكثر من 3 dB لمستوى معيّنٍ لشدة الصوت الداخلة ضمن هذا المدى من الترددات. بأيّ نسبةٍ تتغير الشدة لتغيّر مستوى الصوت الأقصى ومقداره 3 dB؟

النّهج: نفرض أنّ متوسط الشدة هو I_1، ومتوسط مستوى الصوت هو β_1. وبالتالي فإنّ الشدة القصوى I_2 ترتبط بمستوى $\beta_2 = \beta_1 + 3\text{ dB}$. ثم نستعمل العلاقة بين المستوى والشدة، (المعادلة 12-1).

الحلّ:

$$\beta_2 - \beta_1 = 10\log\frac{I_2}{I_0} - 10\log\frac{I_1}{I_0}$$

$$3\text{ dB} = 10\left(\log\frac{I_2}{I_0} - \log\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$= 10\log\frac{I_2}{I_1}$$

لأنّ (ملحق أ) $(\log a - \log b) = \log a/b$ إذن

$$\log\frac{I_2}{I_1} = 0.30$$

أو $\frac{I_2}{I_1} = 10^{0.30} = 2.0$

$y = 10^x$ تعني $x = \log y$

لذلك ± 3 dB تكافيء مضاعفة الشدة أو تقليلها إلى النصف.

التمرين ب: إذا كانت زيادة 3 dB تعني "ضعف الشدة"، فماذا تعني زيادة 6 dB؟

من المهمّ ملاحظة أنّ فرق 3 dB في مستوى الصوت (يعني مضاعفة شدة الصوت كما رأينا قبل قليل) يعني تغيّرًا صغيرًا جدًّا في الإحساس بارتفاع الصوت. وفي الواقع، يستطيع الإنسان العادي أن يميّز فرقًا في مستوى الصوت بحدود 1 أو 2 dB.

وفي العادة، يقل ارتفاع (علو) الصوت أو شدته كلما ابتعدت عن مصدر الصوت. وفي الغرف الداخلية، ينخفض هذا الأثر بسبب الانعكاس من الجدران. وعلى أيّ حال، إذا كان المصدر في حيّزٍ مفتوح، بحيث ينتشر الصوت بحرية في الاتجاهات جميعها، فإنّ الشدة تقلّ مع مقلوب مربع المسافة

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

كما رأينا في (البند 11-9) . وعلى مسافاتٍ بعيدة، تتناقص الشدة بمعدّلٍ أسرع من $1/r^2$؛ لأنّ بعض الطاقة يتحول إلى حركة غير منتظمة لجزيئات الهواء. وهذا الضياع يحدث أكثر عند الترددات المرتفعة. لذا، سيكون أيّ صوتٍ مكوّنٍ من عدّة تردداتٍ أقلّ "وضوحًا " عند مسافةٍ كبيرة.

تطبيق الفيزياء
ضجيج طائرة نفاثة.

المثال 12-5 ضجيج الطائرة

مستوى الصوت الذي يقاس على بعد 30 m من طائرةٍ نفّاثةٍ هو 140 dB. ما مستوى الصوت على بعد 300 m؟ (أهمل الانعكاس عن الأرض).

النّهج: لأننا أعطينا مستوى الصوت، يمكننا حساب شدة الصوت على بعد 30 m من (المعادلة 12-1) . ولأنّ الشدة تتناقص مع مربع البعد. لذا، نحسب الشدة I على بعد 300 m، ثم نطبق (المعادلة 12-1) مرّةً أخرى لإيجاد مستوى الصوت.

الحلّ: الشدة I على بعد 30 m تساوي

$$140 \text{ dB} = 10 \log\left(\frac{I}{10^{-12}\text{ W/m}^2}\right)$$

وبقلب معادلة اللوغاريتمات لايجاد قيمة I نحصل على

$$10^{14} = \frac{I}{10^{-12}\text{ W/m}^2}$$

ولذلك $I = (10^{14})(10^{-12}\text{ W/m}^2) = 10^2\text{ W/m}^2$. وعلى بعد 300 m، أي 10 مرّاتٍ أبعد، ستكون الشدة من قيمتها $(\frac{1}{10})^2 = 1/100$ عند 30 m أي 1 W/m^2. وهكذا:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{1\text{ W/m}^2}{10^{-12}\text{ W/m}^2}\right) = 120 \text{ dB}$$

حتى على بعد 300 m، فإنّ الصوت يكون عند عتبة الألم. ولهذا، يستخدم العاملون في المطارات واقيات للأذن لحماية آذانهم من الضرر (الشكل 12-4).

ملحوظة: هنا طريقة أسهل بدلًا من استعمال (المعادلة 12-1) لأنّ الشدة تقلّ مع مربع البعد، فعند 10 أمثال المسافة، تقلّ الشدة بنسبة $\frac{1}{100} = (\frac{1}{10})^2$. ويمكننا استعمال نتيجة أنّ 10 dB تعني تغيّرًا في شدة الصوت بنسبة 10 (انظر المثال السابق 12-3). ولذلك، فإنّ تغيرًا في الشدة بمعامل 100 يقابل تغيرًا في مستوى الصوت مقداره $(2)(10\text{ dB}) = 20\text{ dB}$. وهذا يؤكد النتيجة التي حصلنا عليها: $140\text{ dB} - 20\text{ dB} = 120\text{ dB}$.



الشكل 12-4 (المثال 12-5)عامل في مطار يضع واقية أذن لتقليل شدة الصوت

التمرين جـ: إذا ضاعفت بعدك عن مصدر الصوت الذي ينتشر في الاتجاهات جميعها ، فكيف تتغير الشدة التي تسمعها؟ كم dB يتغير مستوى الصوت؟

*الشدة وعلاقتها بالسعة

تتناسب الشدة I لموجةٍ ما مع مربّع اتساع الموجة A، كما ناقشنا في (البندين 11 - 9 و 11 - 10). وبالتالي يمكن ربط الاتساع كميًّا بالشدة I أو المستوى β كما يبين المثال التالي:

المثال 12-6 الاتساع، كم هو بالغ في الصغر!

احسب اتساع جزيئات الهواء لصوت تردده 1000 Hz عند عتبة السمع.

النّهج: وجدنا في (البند 11 - 10) علاقة بين الشدة I واتساع الإزاحة A للموجة، (المعادلة 11 - 18). والمطلوب هو معرفة اتساع الاهتزازة لجزيئات الهواء، ومعلوم معنا الشّدّة.

الحلّ: عند عتبة السمع $I = 1 \times 10^{-12}\text{ W/m}^2$ (الجدول 12-2) نحلّ (المعادلة 11 - 18) لإيجاد الاتساع A

$$A = \frac{1}{\pi f}\sqrt{\frac{I}{2\rho v}}$$

$$= \frac{1}{(3.14)(1.0 \times 10^3\text{ s}^{-1})}\sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-12}\text{ W/m}^2}{(2)(1.29\text{ kg/m}^3)(343\text{ m/s})}}$$

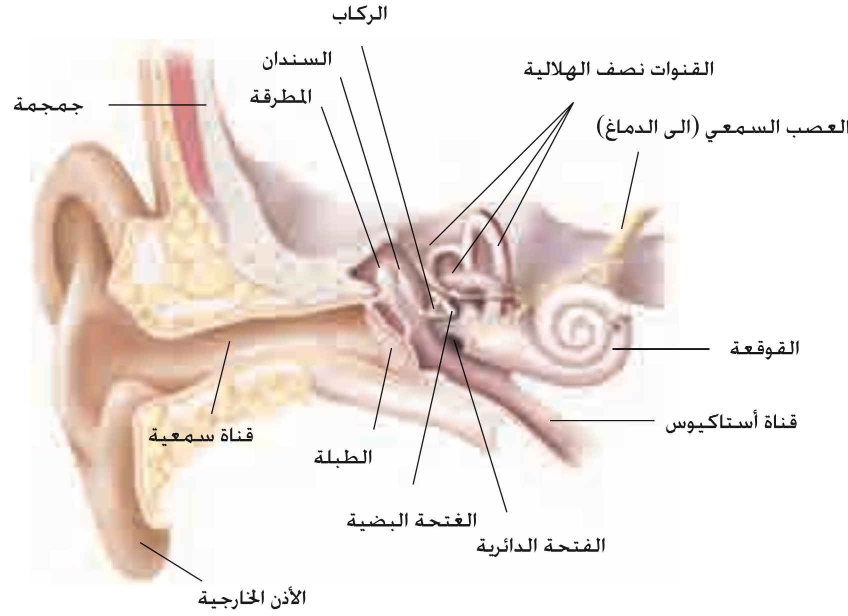
$$= 1.1 \times 10^{-11}\text{ m},$$

حيث افترضنا كثافة الهواء 1.29 kg/m^3 وسرعة الصوت في الهواء 343 m/s (عند 20°C).

ملحوظة: كم هي حساسة أذن الإنسان الفائقة! إنّها تستطيع الكشف عن إزاحة جزيئات الهواء التي هي في الواقع أقل من قطر الذرة (حوالي 10^{-10} m).

تطبيق الفيزياء
الحساسية الفائقة للأذن

تكشف الأذن إزاحات أقل من حجم الذرات.



الشكل 12-5 رسم لأذن الإنسان

* 3-12 الأذن واستجابتها : ارتفاع الصوت

إنّ أذن الانسان كاشفة للصوت لأنّها ذات حساسية فائقة. والكاشفات الميكانيكية (الميكروفون) تستطيع بالكاد منافسة الأذن في كشف الأصوات ذات الشدة القليلة.

يتلّخص عمل الأذن في تحويل الطاقة الاهتزازية للموجات إلى شارات كهربائية تُحمل إلى الدماغ بواسطة الأعصاب. وأمّا عمل الميكروفون، فهو قريبٌ من هذا؛ حيث تصطدم الموجات الصوتية بغشاء الميكروفون فيبدأ بالاهتزاز، ومن ثمّ تتحول هذه الاهتزازات إلى شارات كهربائية بالترددات نفسها والتي يتمّ تكبيرها، وبعد ذلك ترسل إلى السماعة أو جهاز التسجيل. سوف نناقش عمل الميكروفون عندما ندرس الكهرباء والمغناطيسية في فصول لاحقة. أمّا الآن فسنناقش تركيب الأذن وعملها.

تطبيق الفيزياء
أذن الانسان

يظهر (الشكل 12 - 5) رسما لأذن الإنسان؛ تتكون الأذن من ثلاثة أجزاء رئيسة هي: الأذن الخارجية، والأذن الوسطى، والأذن الداخلية. ففي الأذن الخارجية، تنتقل موجات الصوت القادمة من الخارج عبر القناة السمعية إلى طبلة الأذن فتهتز استجابة للموجات الساقطة. أمّا الأذن الوسطى، فتتكون من ثلاث عظيمات هي: المطرقة، والسندان، والركاب، التي تحوّل بدورها اهتزازات الطبلة إلى الأذن الداخلية عبر الفتحة البيضوية. هذا النظام الرقيق من الروافع المتصل بالطبلة ذات المساحة الكبيرة نسبة إلى مساحة الفتحة البيضوية يؤدي إلى تضخيم الضغط حوالي 40 مرة. في حين تتكون الأذن الداخلية من قنوات نصف هلالية، ودورها مهمٌّ جدًّا في ضبط التوازن، وكذلك القوقعة المملوءة بالسائل، والتي تحوّل الطاقة الاهتزازية للصوت إلى طاقة كهربائية ترسل إلى الدماغ.

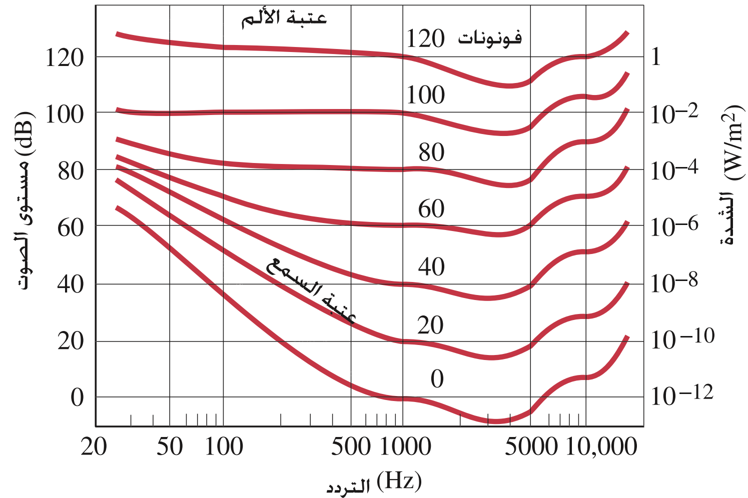
* استجابة الأذن

حساسية الأذن

الأذن ليست حساسة بالدرجة نفسها للتردّدات جميعها؛ فسماع ارتفاع الصوت نفسه لترددات مختلفة يتطلب شدات مختلفة. وقد بينت الدراسات التي أجريت على أعدادٍ كبيرةٍ من الأفراد المنحنيات الظاهرة في (الشكل 12 - 6) . وفي هذا الرسم يمثل كلّ منحنى أصواتا بدت متساوية الارتفاع.

ارتفاع الصوت (بـ phons).

يمثّل الرقم المبيّن على كلّ منحنىً مستوى الارتفاع (وحداته تُسَمَّى Phons)، والذي يساوي عدديًّا مستوى الصوت بـ dB عند 1000 Hz. فمثلا المنحنى المشار اليه بِـ 40 يمثّل أصواتًا تسمع من الشخص المتوسط لها الارتفاع نفسه كصوت تردده 1000 Hz ومستواه الصوتي 40 dB. ومن هذا المنحنى ذي 40 phon نرى أنّ نغمة ترددها 100 Hz يجب أن يكون مستواها الصوتي 62 dB كي تدرك ارتفاع نغمة ترددها 1000 Hz وارتفاعها 40 dB.



الشكل 12-6
حساسية أذن الانسان كدالة في التردد (انظر النّص). لاحظ أنّ تدريج التردد " لوغاريتمي" لتغطية مدى واسع من الترددات.

يمثّل المنحنى السفليُّ في (الشكل 12-6 المشار إليه بـ 0) مستوى الصوت كدالة بالتردد لعتبة السمع، وأنّ أرهف صوت سيسمع بأذن جيّدةٍ جدًّا. لاحظ أنّ حساسيّة الأذن كبيرةً للتردّدات بين 2000 و 4000 هيرتز، وهذه شائعة في الحديث والموسيقى. لاحظ أيضًا أنّه حيث يكون صوت تردده 1000 Hz مسموعًا وارتفاعة 0 dB، فإنّ صوتًا تردّده 100 Hz ولكن بارتفاع حوالي 40 dB سيكون مسموعًا أيضًا. يمثّل المنحنى الأعلى في (الشكل 12-6) المشار اليه بِـ 120 phons عتبةَ الألم. والأصوات الأعلى من هذا المستوى يمكن الشعور بها، ولكنّها تسبب ألما.

(الشكل 12 - 6) يوضّح أنّه عند الأصوات ذات المستوى المنخفض، تكون آذاننا أقلّ حساسية للترددات العالية والمنخفضة مقارنة مع الترددات المتوسطة. إنّ جهاز التحكم في الارتفاع في أنظمة الجسم مصممة لتعويض قلّة الحساسية هذه. وعندما يقلّ الحجم، فإنّ جهاز تحكم الارتفاع يرفع الترددات المنخفضة والعالية نسبة إلى الترددات المتوسطة، بحيث يكون تردد الصوت متوازنا. إلا أنّ كثيرًا من المستمعين يجدون أنّ الصوت أكثر إمتاعا إن لم يتم التحكم بالارتفاع.

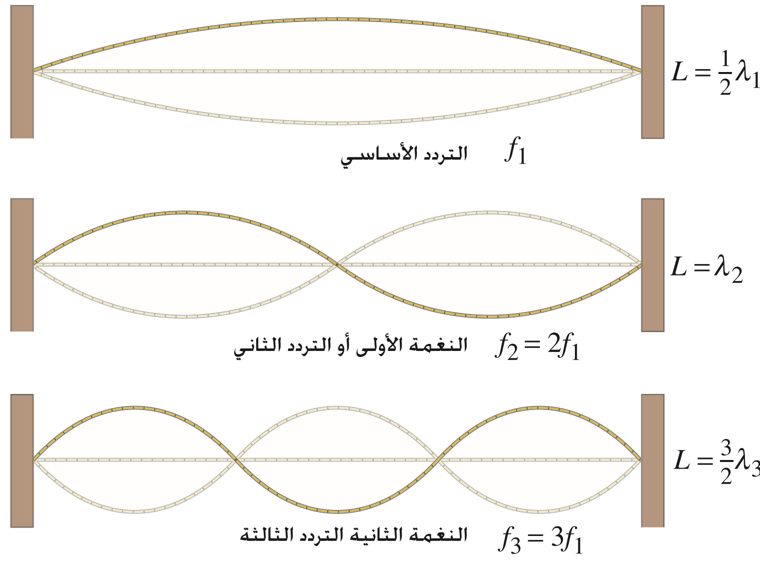
4-12 مصادر الصوت: الأوتار المهتزة والأعمدة الهوائية

إنّ مصدر أيِّ صوتٍ هو جسمٌ مهتز. وعلى الأغلب، فإنّ أيّ جسم يمكن أن يهتز ويصبح مصدرًا للصوت. وسنناقش الآن بعض المصادر البسيطة للصوت، خاصة الأدوات الموسيقية؛ ففي الآلات الموسيقية يوضع الجهاز في حالة اهتزاز عن طريق: الضرب، أو النقر، أو التقوس، أو النفخ. تنتج موجات واقفة، ويهتز المصدر بتردداته الطبيعة. ويكون المصدر المهتز على اتصال مع الهواء (أو أيّ وسط آخر) ويدفعه لإنتاج موجات صوتية تنتشر نحو الخارج. وتكون ترددات الموجات مساويةً لتردّد المصدر، ولكن مع اختلاف السرعة وطول الموجة. الطبل له غشاءٌ مشدودٌ يهتز. الكسايلوفون والمرمبة (Xylophone and marimbas) لهما قضبان خشبيّة أو فلزيّة تجعلها تهتز. كما أنّ الأجراس وغيرها تستعمل المعادن المهتزة أيضًا. إلّا أنّ أكثر الأدوات المستعملة تستخدم الأوتار المهتزة، كالكمان، والقيثارة، والبيانو. أمّا بعضها الآخر فيستخدم الأعمدة الهوائية المهتزة، كالناي، والبوق، وأنابيب الأرغون. وقد رأينا سابقًا أنّ التردّد يحدّد درجة الصوت. بعض الترددّات النموذجيّة للنغمات الموسيقية على " السلم الموسيقي" مبينة في (الجدول 12-3) للجواب الثماني الذي يبدأ بـ C الوسطى. لاحظ أنّ ثماني واحد يعني مضاعفة التردد. فمثلًا تردد C الوسطى هو 262 Hz، ولكن C′ (C فوق C الوسطى) لها ضعف التردد، 524 Hz. [الوسطى هي نغمة "do" على لوحة مفاتيح البيانو].

جدول 12ـ3 السّلّم الموسيقي *

النغمة	التردد (Hz)
C	262
C# أو D♭	277
D	294
D# أو E♭	311
E	330
F	349
F# أو G♭	370
G	392
G# أو A♭	415
A	440
A# أو B♭	466
B	494
C′	524

*تم أخذ أوكتان واحد فقط بالحسبان



الشكل 12-7 موجات موقوفة في وتر - الترددات الثلاثة المنخفضة هي المبينة فقط.

الآلات الموسيقية الوترية

تطبيق الفيزياء
الآلات الوترية.

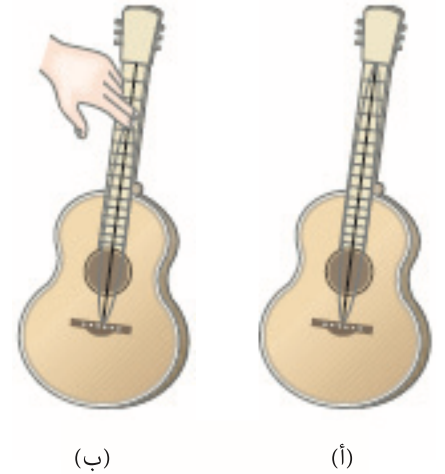
رأينا في الفصل 11، (الشكل 11 - 40) كيف تتكوّن الموجات الواقفة في وتر، وسنبيّن ذلك مرة أخرى في (الشكل 12 - 7) . وهذه الموجات الواقفة في الأساس هي للآلات الوتريّة جميعها. تُحدّد الدرجة عادةً بتردد الرنين الأصغر الأساسي الذي يتضمن تكوين عقد عند الأطراف فقط. إنّ الوتر الذي يهتزّ كاملًا نحو الأعلى والأسفل يكافىء نصف طول موجة، كما هو مبين في أعلى (الشكل 12 - 7) ؛ ولذلك يكافىء طول الموجة للنغمة الأساسية مثلي طول الوتر. إذن، فالتردد الأساسي هو $f_1 = v/\lambda = v/2L$، حيث v سرعة الموجة في الوتر. والترددات الممكنة للموجات الواقفة في وتر مشدود هي أعداد صحيحة من النغمة الأساسية

$$f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

(تمامًا كما في المعادلة 11 - 19 ب)، حيث $n=1$ تعود للتردد الأساسي و $n = 2, 3, \cdots$ هي الحل. الموجات الواقفة كلها $n = 1, 2, 3, \cdots,$ تسمى التوافقيات*، كما رأينا في (البند 11-13) .
عند وضع الأصبع على وتر قيثارة أو كمان، فإنّ الطول الفاعل للوتر يقصر. لذلك، فإنّ تردده الأساسي ودرجته يصبحان أعلى لأنّ طول الموجة يصبح أقصر (الشكل 12-8).
إنّ طول الأوتار جميعها في القيثارة أو الكمان متساوية، ولكنّها تصدر أصواتًا مختلفة الدرجة؛ لأنّ الأوتار لها كتلة لكلّ وحدة طول m/L ، مختلفة، وهي تؤثر في السرعة v، (المعادلة 11-13) ،

$$v = \sqrt{F_T/(m/L)} \qquad \text{[وتر مشدود]}$$

وعليه، تكون السرعة في وتر أثقل أقلّ، وكذلك فإنّ التردد لطول الموجة نفسها أقلّ، كما قد يختلف الشد F_T كذلك. ويعدّ تغيير الشد الوسيلةَ لتنغيم الدرجة لكلّ وتر. أما في البيانو والقيثارة، فإنّ الأوتار لها أطوال مختلفة. وللنغمات المنخفضة، تكون الأوتار أثقلّ وليس فقط أطول، وسبب هذا موضح في المثال التالي.



الشكل 12-8 طول الموجة (أ) الوتر غير المحترك أطول منه. (ب) وتر موضوع عليه أصبع. لذا، فإن تردد الوتر الذي عليه الأصبع أكبر. هنا وتر واحد مبين على هذه القيثارة والموجة الواقفة الأبسط، الأساسية، هي الوحيدة الموضحة.

المثال 12-7 أوتار البيانو.

المفتاح الأعلى على البيانو يعني ترددا مقداره نحو 150 مرةً مقدار تردد المفتاح السفلي. إذا كان طول الوتر للنغمة العليا 5.0 cm، فما الطول الذي يكون لوتر النغمة السفلية إذا كانت الكتلة لكلّ وحدة طول متساوية وتحت الشد نفسه؟

النّهج: بما أنّ $v = \sqrt{F_T/(m/L)}$ فإنّ السرعة تكون متساوية في كلّ وتر. لذلك يكون التردد متناسبا عكسيّا مع الطول $(f = v/\lambda = v/2L)$.

* عندما تكون ترددات الرنين فوق الأساسي (أي الحل) أعدادًا صحيحة من النغمة الأساسية، كما هو الحال هنا، فإنّها تُسَمّى توافقيّات. ولكن إذا كانت هذه الترددات (الحل) ليست أعدادًا صحيحةً من النغمة الأساسية، كاهتزاز الطبل، فلا تُدعى عندئذٍ توافقيات.

الحلّ: يمكننا كتابة النسبة للنغمات الأساسية لكلّ وتر كما يلي:

$$\frac{L_L}{L_H} = \frac{f_H}{f_L}$$

حيث تشير L وH إلى أخفض النغمات وأعلاها على التردد. وهكذا

$$L_L = L_H(f_H/f_L) = (5.0\ \text{cm})(150) = 750\ \text{cm}$$

أو

$$= 7.5\ \text{m}$$

وهذا طول غير مناسب لبيانو.

ملحوظة: تصنع الأوتار الطويلة للترددات المنخفضة بصورة ثقيلة. ولذلك حتى في البيانو العملاق، فإنّ الأوتار تكون أقلّ من 3 m.



(أ)



(ب)

الشكل 12-9 (أ) البيانو يبين الصفيحة التي تثبت فيها الأوتار.(ب) صندوق المصوات (القيثار).

تنويه:

سرعة الموجة في الوتر المشدود ≠ سرعة الموجة الصوتية في الهواء.

المثال 12-8 الترددات والأطوال الموجية في الكمان

وتر كمان طوله 0.32 m ينغم ليعزف النغمة A فوق النغمة الوسطى C عند تردد 440 Hz. (أ) ما طول موجة الاهتزازة الأساسية للوتر؟ (ب) ما طول الموجة والتردد للموجات الصوتية الناجّة؟ (جـ) لِمَ هذا الاختلاف؟

النّهج: طول موجة الاهتزازة الأساسية للوتر تساوي ضعف طول الوتر (الشكل 12-7). عند اهتزاز الوتر، يدفع الهواء، وهو بدوره يجبر على الاهتزاز عند تردد الوتر نفسه.

الحلّ: (أ) من (الشكل 12-7)، طول موجة النغمة الأساسية هو

$$\lambda = 2L = 2(0.32\ \text{m}) = 0.64\ \text{m} = 64\ \text{cm}$$

وهذا هو طول الموجة الواقفة في الوتر.

(ب) موجة الصوت التي تنتشر بعيدا في الهواء (للوصول إلى الأذن) لها التردد 440 Hz نفسه. وطول موجتها هو

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\ \text{m/s}}{440\ \text{Hz}} = 0.78\ \text{m} = 78\ \text{cm}$$

حيث v سرعة الصوت في الهواء (عند درجة 20°C)، (البند 12-1)

(جـ) يختلف طول موجة الصوت عن طول الموجة الواقفة في الوتر؛ لأنّ سرعة الصوت في الهواء 343 m/s، وهي تختلف عن سرعة الموجة في الوتر ($= f\lambda = 440\ \text{Hz} \times 0.64\ \text{m} = 280\ \text{m/s}$) التي تعتمد على كلّ من الشد في الوتر وكتلة وحدة الأطوال فيه.

ملحوظة: إنّ الترددات في الأوتار وفي الهواء هي ذاتها: الوتر والهواء في حالة تماس، والوتر "يجبر" الهواء على الاهتزاز عند التردد نفسه. ولكن الأطوال الموجيه مختلفة؛ لأنّ سرعة الموجة في الوتر تختلف عنها في الهواء.

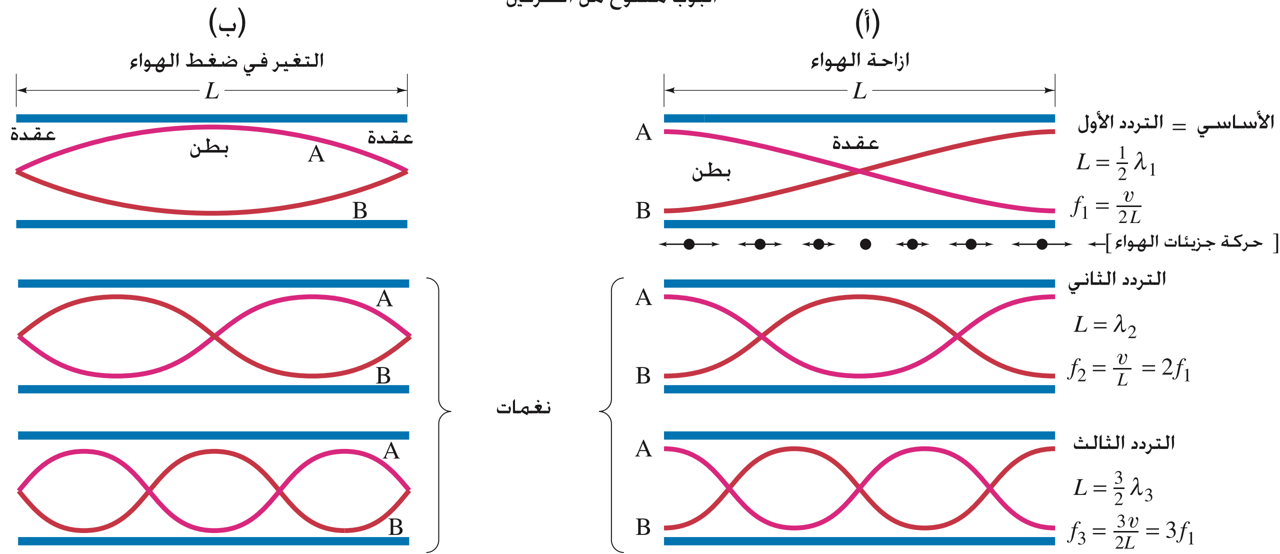
إنّ الآلات الوترية لن تكون عالية الصوت إذا اعتمدت على أوتارها المهتزة للحصول على الموجات الصوتية؛ لأنّ الأوتار رفيعة لتضغط الهواء وتمدّه. لذا، فإنّ الآلات الوترية تستفيد من مكبرات ميكانيكية تعرف بـ "لوحة المصوات (البيانو) أو صندوق المصوات (القيثارة ، الكمان) التي تعمل على تكبير الصوت بوضع مساحة سطح أكبر على اتصال مع الهواء (الشكل 12-9) وعندما تهتز الأوتار، تبدأ الصفيحة المصوات أو الصندوق المصوات بالاهتزاز أيضًا. ولأنّ لها مساحة سطح واسعة على اتصال بالهواء، يمكنها توليد موجة صوتية أكبر شدّة. أمّا في القيثارة الكهربائية، فليست هناك أهمية لصندوق المصوات؛ لأنّ الموجات تكبر إلكترونيا.

الشكل 12-10 من آلات النفخ: المزمار والناي



آلات النفخ الموسيقية

تنتج الآلات الموسيقية كآلات النفخ النحاسية، وأنابيب الأرغون الصوتَ من اهتزازات الموجات الواقفة في عمود من الهواء داخل أنبوب، (الشكل 12 - 10). وهنا، يمكن أن تتكون الموجات الواقفة في الهواء في أيّ تجويف، إلا أنّ الترددات الواقفة تكون معقدة حتى لأبسط الأشكال مثل أنبوب الناي المنتظم أو أنبوب الأرغون. في بعض الآلات كالمزمار المهتز، وشفتا العازف تساعد في تكوين اهتزازات في العمود الهوائي. وفي آلات أخرى، يوجه تيار هواء نحو حافة الفتحة أو الفم مما يؤدّي إلى اضطراب يولّد الاهتزازات. وبسبب هذا الاضطراب، وبصرف النظر عن مصدره، فإنّ الهواء يهتز في الأنبوب بترددات متنوعة، ولكن الترددات التي تأتي من موجات واقفة هي التي ستدوم فقط.



الشكل 12-11 رسومات لثلاث اهتزازات بسيطة (موجات واقفة) لأنبوب منتظم مفتوح الطرفين ("أنبوب مفتوح"). هذه الاهتزازات الأبسط مبينة في: (أ) إلى اليسار بدلالة إزاحات الهواء. (ب) إلى اليمين بدلالة ضغط الهواء. كلّ رسم يبيّن هيئة الموجة في لحظتين A، و B ، بينهما نصف الزمن الدوري. الحركة الحقيقية للجزيئات لإحدى الحالات، النغمة الأساسية، مبينة مباشرة تحت الأنبوب إلى قمة اليسار.

في الوتر مثبت الطرفين، (الشكل 12-7) ، تتكون موجات واقفة لها عُقَدٌ (دون حركة) عند نهايتي الوتر، وواحد أو اكثر من البطون (اتساع كبير للاهتزاز) بينهما. والعقدة تفصل بطنين متتاليين. تحوي الموجة الواقفة ذات التردد الأقلّ الأساسية بطنا واحدا. وتُسَمّى الموجات الواقفة ذات الترددات الأكثر (الحل) أو التوافقيات، كما رأينا في (البند 11 - 13). بالتحديد، فإنّ التوافقي الأول هو الأساسي، والتوافقي الثاني (هو الجواب الأول) وله ضعف تردد الأساسي، وهكذا.

إنّ الوضع مشابه لعمود من الهواء في أنبوب منتظم القطر، ولكن علينا تذكّر أنّ الهواء نفسه هو الذي يتذبذب. ويمكننا وصف الموجات إما بدلالة تدفق الهواء؛ أي بدلالة إزاحات جزيئات الهواء، أو بدلالة الضغط في الهواء. (انظر الشكلين 12-2 و12-3). بدلالة الإزاحة، الهواء عند الطرف المغلق للأنبوب هو عقدة إزاحة حيث الهواء ليس حرّ الحركة هناك، أما بالقرب من النهاية المفتوحة للأنبوب فسيكون هناك بطن؛ لأنّ الهواء يستطيع الحركة بحرية نحو الداخل والخارج. والهواء داخل الأنبوب يتحرك بشكل موجات طولية واقفة. يبين (الشكل 12-12) أنماط الاهتزاز المحتملة **لأنبوب مفتوح** من طرف واحد ومغلق في الطرف الآخر (يسمى **أنبوبا مغلقا**).] إذا كان الأنبوب مغلق الطرفين وليس له اتصال بالهواء الخارجي فهو عديم الفائدة كآلة موسيقية[. الأشكال في الفرع (أ) من الرسم (على باليمين) تمثل اتساع الإزاحة للهواء المهتز في الأنبوب. لاحظ أنّ هذه رسومات، أما جزيئات الهواء الحقيقية فتهتز أفقيا موازية لطول الأنبوب، كما هو مبين بالأسهم الصغيرة في الرسم العلوي (بالشكل 12-2 أ) على اليمين. يعتمد الموقع الحقيقي للبطن قرب طرف الأنبوب المفتوح على قطر الأنبوب، ولكن إذا كان القطر صغيرا مقارنة بالطول، وهي الحالة المعتادة، فإنّ البطن يحدث قريبًا جدًّا من الطرف كما هو مبين. وسوف نفرض أنّ هذه هي الحالة في ما سيتبع. (قد يعتمد موقع البطن على طول الموجة وعوامل أخرى).

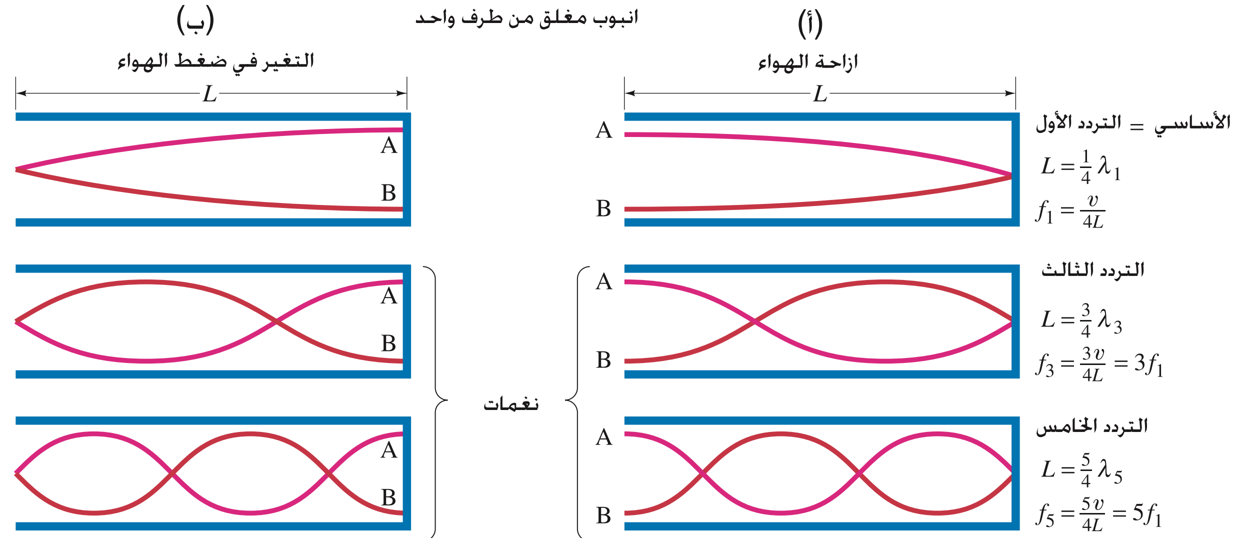
تطبيق الفيزياء
آلآت النفخ

الأنبوب المفتوح

دعنا ننظر بالتفصيل إلى الأنبوب المفتوح، في (الشكل 12-11أ) ، والذي قد يكون أنبوب أرغون أو ناي. الأنبوب المفتوح له بطن إزاحة عند كلتا النهايتين لأنّ الهواء حرّ الحركة عند النهايات المفتوحة. ويجب أن تكون هناك عقدة واحدة على الأقلّ في الأنبوب المفتوح إذا كانت هناك موجة واقفة. تمثل عقدة واحدة التردد الأساسي للأنبوب. ولأنّ المسافة بين عقدتين متتاليتين، أو بين بطنين متتاليين هي $\frac{1}{2}\lambda$، فإنّ هناك نصف طول موجة ضمن طول الأنبوب للحالة البسيطة الأساسية (الشكل العلوي 12-11 أ): $L = \frac{1}{2}\lambda$ أو $\lambda = 2L$ إذن، فالتردد الأساسي هو $f_1 = v/\lambda = v/2L$، حيث v هي سرعة الصوت في الهواء (الهواء في الأنبوب).

تنتج الأنابيب المفتوحة التوافقيات جميعها.

إنّ الموجة الواقفة بعقدتين هي الجواب الأول أو التوافقي التالي، وله نصف طول الموجة $(L = \lambda)$ وضعف التردد الأساسي. وبالفعل، فإنّ تردد كلّ جواب هو عدد صحيح من تردد النغمة الأساسية في أنبوب منتظم مفتوح الطرفين، كما هو مبين في (الشكل 12-11أ) . وهذا هو نفسه ما نجده في حالة الوتر.



الشكل 12-12 أنماط الاهتزاز (موجات موقوفة) لأنبوب مغلق من طرف واحد (" أنبوب مغلق). انظر التعليق على (الشكل 12-11).

الأنبوب المغلق

في حالة الأنبوب المغلق المبيّن في (الشكل 12-12 أ) ، والذي قد يكون أنبوب أرغون، هناك دائمًا عقدة إزاحة عند الطريق المغلق (الهواء ليس حرّ الحركة) وهناك بطنٌ عند الطرف المفتوح (الهواء حرّ الحركة). وبما أنّ المسافة بين العقدة والبطن الذي يليها هي $\frac{1}{4}\lambda$، فإننا نرى أنّ التردد الأساسي في الأنبوب المغلق يقابل ربع طول موجة ضمن طول الأنبوب: $L = \lambda/4$ و $\lambda = 4L$. وعليه، فإنّ التردد الأساسي يساوي $f_1 = v/4L$، أو نصف ذلك للأنبوب المفتوح ذي الطول ذاته. وهناك فرق آخر نراه في (الشكل 12-12 أ)، وهو أنّ التوافقيات الفردية موجودة فقط في الأنبوب المغلق: الحل لها ترددات ... ,7 , 5 , 3 مضروبة في التردد الأساسي. ليس هناك أيّ مجال موجات بـ ... ,6 , 4 , 2 مضروبة في التردد الأساسي، لأنّ هذا يتطلب عقدة عند أحد الطرفين، وبطنا عند الطرف الآخر، ولذلك لا يمكن أن تكوّن موجات موقوفة في أنبوب مغلق.

تنتج الأنابيب المغلقة توافقيات فردية فقط.

وهناك طريقة أخرى لتحليل الاهتزازات في أنبوب منتظم عن طريق وصف الاهتزازة بدلالة الضغط في الهواء، المبين في الفرع (ب) من (الشكلين 12 - 11 و 12-12) (الجوانب على اليسار). إذا كان الهواء مضغوطا، فسيكون الضغط أكبر، أما في تخلّل (تمدّد) الموجة، فيكون الضغط أقلّ من الضغط العادي. النهاية المفتوحة للأنبوب مفتوحة على الضغط الجوي. لذا، يجب أن يكون التغيُّر في الضغط عند النهاية المفتوحة عقدةً: الضغط لا يتغير، ولكنه يبقى مساويا للضغط الجوي الخارجي. وإذا كان للأنبوب طرف مغلق، فإنّ الضغط عند هذا الطرف يتفاوت ليكون أعلى من الضغط الجوي أو أقلّ. لذا، هناك "بطن" ضغط عند النهاية المغلقة للأنبوب. ويمكن أن يكون هناك عقد وبطون داخل الأنبوب. يبين (الشكل 12 - 11ب) بعض الاهتزازات الممكنة بدلالة الضغط لأنبوب مفتوح . في حين يبين (الشكل 12-12ب). هذا لأنبوب مغلق.

المثال 12-9 أنابيب الأرغون

ماذا سيكون تردد النغمة الأساسية، وأول ثلاثة أجوبة لأنبوب أرغون طوله 26 *cm* عند درجة 20°C إذا كان (أ) مفتوحا؟ (ب) مغلقا؟

النّهج: حساباتنا جميعها مبنيّة على (الشكل 12-12أ) .

الحلّ: (أ) للأنبوب المفتوح، (الشكل 12-11أ) ، التردد الأساسي هو

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343\ \text{m/s}}{2(0.26\ \text{m})} = 660\ \text{Hz}$$

السرعة v هي سرعة الصوت في الهواء (الهواء المهتز في الأنبوب). وتتضمّن الحلّ التوافقيات : 1320 Hz، 1980 Hz و 2640 Hz وهكذا.

(ب) للأنبوب المغلق، (الشكل 12-12 أ) ، التردد الأساسي هو

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343\ \text{m/s}}{4(0.26\ \text{m})} = 330\ \text{Hz}$$

الحل الفرديّة فقط هي التي تكون موجودة: الحل الثلاثة الأولى هي 990 Hz ، و 1650 Hz، و 2310 Hz.

ملحوظة: يعزف الأنبوب المغلق 330 Hz والذي- من (الجدول 12 - 3) - يكون E فوق C الوسطى، أمّا الأنبوب المفتوح الذي له الطول نفسه فيعزف 660 Hz، أي أعلى بنغمة ثمانية.

تُستعمل أنابيب الأرغون مفتوحةً ومغلقةً بأطوالٍ من سنتمتراتٍ قليلةٍ إلى 5 m أو أكثر. والتصّرف في الناي كأنبوب مفتوح؛ لأنّها مفتوحة من الطرف الذي يُنفخ فيه، ومن الطرف المقابل كذلك. ويمكن الحصول على نغمات مختلفة في الناي بتقصير طول عمود الهواء المهتز؛ من خلال عدم تغطية الفتحات على امتداد الأنبوب(لذا، يحصل بطن إزاحة عند الفتحة). وعليه، كلّما كان طول عمود الهواء المهتز أقصر، كان التردّد الأساسي أكبر.

المثال 12-10 الناي (الشَّبَّابة)

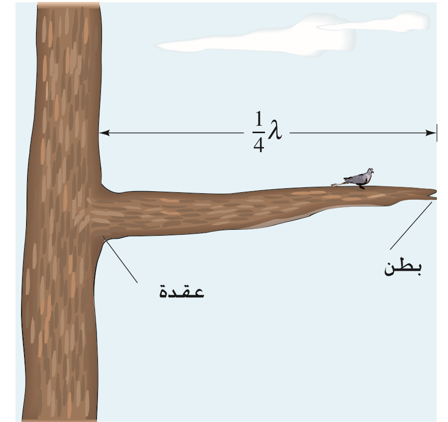
تُصمّم الناي بحيث تعزف نغمةً C (262 Hz) كنغمةٍ أساسيّةٍ عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة (مغطاة). تقريبًا، كم يجب أن يكون طول المسافة من الفم (المزمار) إلى الطرف البعيد؟ (هذا تقريبي فقط؛ لأنّ البطن لا يحدث تمامًا عند المزمار). افرض أنّ درجة الحرارة 20°C.

النّهج: عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة (مغطاة). يكون طول عمود الهواء المهتز هو الطول الكلي للناي. سرعة الصوت في الهواء عند 20°C هي 343 m/s. ولأنّ النّاي مفتوحة الطرفين، نستعمل (الشكل 12-11) : التردد الأساسي $f1$ يرتبط بالطول L من خلال $f = v/2L$

الحلّ: نحلّ لإيجاد L، نجد

$$L = \frac{v}{2f} = \frac{343\ \text{m/s}}{2(262\ \text{s}^{-1})} = 0.655\ \text{m}$$

التمرين د: لمعرفة سبب قيام عازفي آلات النفخ بـ "تسخين" آلاتهم (كي تكون في تناغم)؛ أوجد تردّد الناي الأساسي في (المثال السابق 12 - 10) عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة، ودرجة الحرارة 10°C بدلًا من 20°C.



الشكل 12-13 (المثال 12-11)

المثال 12-11 قدّر تردّدات ضجيج الرياح

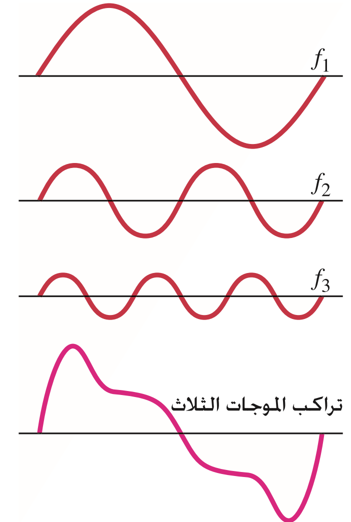
قد تكون الرياح مزعجة؛ فتعصف بالأشجار، وتخرج من المداخن أصواتًا كالعويل، فما الذي يسبب هذا الضجيج؟ وحول أيّ مدى من التردّدات يتوقّع سماعه؟

النّهج: يسبّب هبوب الرياح اهتزازات أغصان الأشجار وتأرجحها. (أو عمود الهواء في المدخنة)، حيث تنتج موجات الصوت بالتردّد نفسه . تشكل نهايةُ غصن الشجرة المثبتة بالجذع عقدةً، أما النهاية الثانية فحرّة الحركة. لذا، فستكون بطنًا. إذن، غصن الشجرة حوالي $\frac{1}{4}\lambda$ (الشكل 12-13).

الحلّ: نقرب $v \approx 4000\ \text{m/s}$ لسرعة الصوت في الخشب (الجدول 12-1). افرض أنّ طول غصن الشجرة $L \approx 2\ \text{m}$. وبالتالي، $\lambda = 4L = 8\ \text{m}$ و $f = v/\lambda = (4000\ \text{m/s})/(8\ \text{m}) \approx 500\ \text{Hz}$

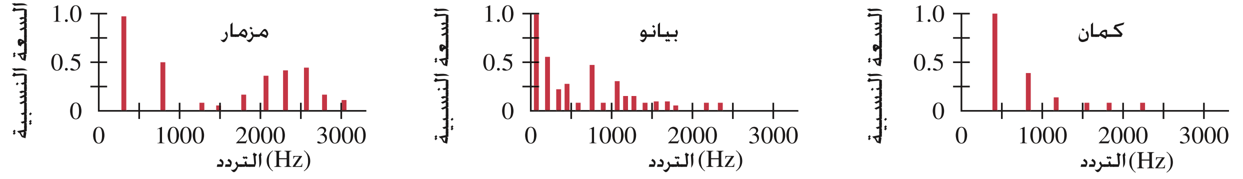
ملحوظة: يمكن أن تبدأ الريح بهزّ الهواء داخل المدخنة، وهذا يشبه إلى حدّ كبير أنبوب الأرغون أو الناي. المدخنة أنبوب طويل، وقد يصل طولها إلى 3m، وتعمل كأنبوب مفتوح عند طرف واحد أو طرفين. فإذا كانت مفتوحة الطرفين ($\lambda = 2L$)، ومع $v \approx 340\ \text{m/s}$ نجد أنّ $f_1 \approx v/2L \approx 56\ \text{Hz}$ وهي عبارة عن نغمة منخفضة؛ فلا غرابة إذن إنْ أصدرت المدخنة هذا الدّويّ.

الشكل 12-14 اتساعات التردد الأساسي وأول جوابين يضافان عند كلّ نقطة للحصول على "المجموع" أو شكل الموجة المركبة.



* 12-5 نوع الصوت، والضجيج؛ التراكب

عندما نسمع صوتًا، وخاصةً الصوت الموسيقي، فإنّنا نكون على علمٍ بارتفاعه ودرجته، ومجال ثالث كذلك يدعى "النوع". فمثلًا، عندما يعزف بيانو وناي نغمةً ذات الارتفاع والدرجة نفسيهما (مثلا C)، نجد أنّ هناك فرقًا واضحًا في الصوت بصورة عامة، حيث نستطيع التمييز بسهولة بينهما. وهذا ما يقصد بنوع الصوت. ومن هنا نستعمل كلمتي "جرس" "ولون النغمة" للآلات الموسيقية. ويمكن ربط كلّ من الارتفاع والدرجة بكميّات فيزيائية، ويمكن كذلك قياسهما، وينطبق هذا على نوع الصوت أيضًا، حيث يعتمد نوع الصوت على وجود الحل: عددها واتساعها النسبي. وبصورةٍ عامة، عند عزف نغمة ما على آلة موسيقية، فإنّ النغمة الأساسية والحل تكونان موجودتين في الوقت نفسه. يوضح (الشكل 12 - 14) كيف ينطبق (البند 12 - 11) مبدأ التراكب لثلاثة أشكال من الموجات، ففي هذه الحالة، النغمة الأساسية وجوابان (مع اتساعات محددة) يضافان معًا عند كلّ نقطة لإعطاء شكل موجة حركية. وهناك في العادة أكثر من جوابين يكونان موجودين.



الشكل 12-15 أطيافٌ صوتيّةٌ لآلاتٍ موسيقيّةٍ مختلفة. تتغيّر الأطياف عندما تعزف الآلات نغماتٍ مختلفة. أمّا المزمار فمعقد نوعًا ما؛ فهو يعمل كأنبوب مغلق عند التردّدات المنخفضة بوجود التوافقة الفرديّة فقط. ولكن عند التردّدات العالية توجد التوافقيات كلّها كما في الأنبوب المفتوح.

(يمكن تحليل أيّ موجةٍ معقَّدةٍ إلى تركيبٍ من موجاتٍ جيبيّة باتساعات، وأطوال موجية وترددات مناسبة. ويُسَمّى مثل هذا التحليل **تحليل فوريه**).

تختلف الاتساعات النسبية لنغمة معينة باختلاف الآلات الموسيقة، وهي التي تميز نوع الصوت الخاص لكلّ آلة وجرسه. يبين الرسم بالأعمدة الاتساعات النسبية للتوافقيات لنغمة ما في آلة موسيقية معينة، والتي تسمى طيف الصوت. وهناك أمثلة نموذجية متعددة لآلات موسيقية مختلفة موضحة في (الشكل 12 - 15) . إنّ أكبر اتساع يكون عادة للنغمة الأساسية، وترددها هو الذي يسمع ويحدّد الدرجة.

إنّ الطريقة التي تعزف بها الآلة الموسيقية تؤثر بقوة في نوع الصوت؛ فجذب وتر القيثار على سبيل المثال يعطي صوتا مختلفا تماما عن سحب قوس عليه. كما نلاحظ أنّ طيف الصوت عند البداية (أو النهاية) لنغمة (عند ضرب وتر بيانو) يكون مختلفا تمامًا عمّا هو عليه في النغمة اللاحقة. وهذا يؤثر أيضًا في نوع نغمة الآلة الموسيقية.

إنّ الصوت العادي كالصوت الناتج من ضرب حجرين معًا يعدّ ضجيجًا له نوعٌ معيّن، ولكن درجته ليست واضحةً تمامًا؛ والسبب هو أنّ مثل هذه الضجة مزيج من الترددات ذات علاقة ضعيفة فيما بينها. كما أنّ الطيف الصوتي المكون من هذه الضجة سوف لا يبني خطوطا كالتي في (الشكل 12 - 15). بل سيعطي طيفاً متصلاً من الترددات أو قريبًا من ذلك. مثل هذا الصوت ندعوه "ضجيجا" بالمقارنة مع الأصوات التوافقية التي تحتوي ترددات هي مضاعفات بسيطة من النغمة الأساسية.

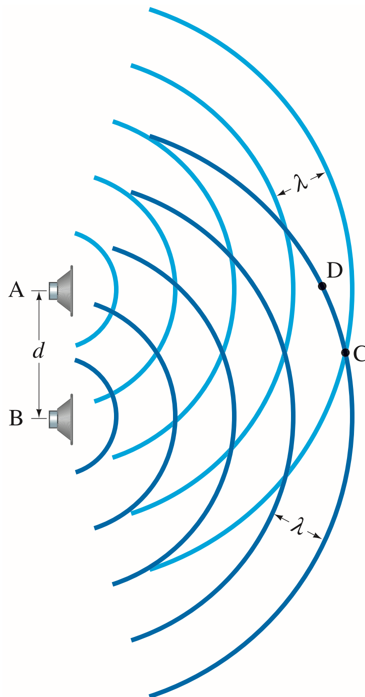
6-12 تداخل موجات الصوت؛ الضربات

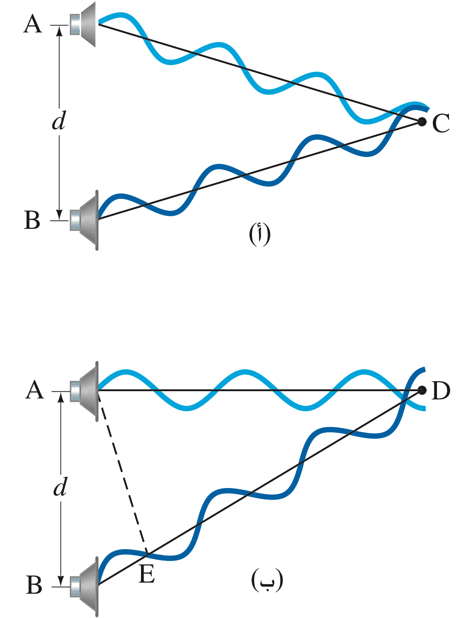
التداخل في الفراغ.

رأينا في (البند 12-11) أنه عندما تعبر موجتان آنيّا في منطقة من الحيز، فانّهما تتداخلان معًا. كما يحدث التداخل في موجات الصوت أيضًا.

افترض وجود سمّاعتين كبيرتين A و B، البعد بينهما d على منصّة مسرح كما يوضّح (الشكل 12-16) . دعنا نفترض أنّ السمّاعتين تطلقان موجات لهما التردد المنفرد نفسه، كما أنّهما في الطور نفسه؛ أي عندما يكون أحد المصدرين تضاغطًا وكذلك يفعل المصدر الثاني. (نهمل الانعكاس من الجدران، الأرض، وهكذا ...). الخطوط المنحنية في الشكل تمثل قمة الموجات الصوتية: فالقمة تعني التضاغط في الهواء، أمّا القاع الذي يقع بين تضاغطين (قمتين)، فهو تخلخل . السامع أو الكاشف عند نقطة مثل C التي تقع على البعد نفسه من المصدرين كليهما سوف تنتج صوتا مرتفعا؛ لأنّ التداخل سيكون بناءً: يصلها قمتان في لحظة واحدة ، كما يصلها تخلخلان في لحظة لاحقة أيضا. ولكن عند نقطة مثل D في الشكل، فسوف يسمع صوت ضعيف أو لا يسمع أيّ شيء؛ لأنّه سيحدث هناك تداخل هدّام: هناك تضاغطات من موجة معينة تلتقي مع تخلخلات من موجة أخرى، والعكس صحيح أيضا (انظر الشكل 11-37) والمناقشة المتعلقة بموجات الماء في البند 11-12).

الشكل 12-16 موجات صوتية من سماعتين تتداخل مع بعضها بعضا.





الشكل 12-17 موجات الصوت ذات التردد نفسه من المصدرين A، و B (انظر الشكل 12-16) تتداخل تداخلا بنّاء عند C وتداخلا هدّاما عند D. [المبين هنا رسومات توضيحية وليست الموجات الصوتية الطولية].

قد يكون تحليل هذا الموقف أوضح إذا مثّلنا شكلي الموجتين بالرسم كما في (الشكل 12-17) . في (الشكل 12-17أ) يمكن ملاحظة أنّه ينتج تداخل بناء عند النقطة C لأنّ كلتا الموجتين وفي الوقت نفسه لهما قمة أو قاع عند وصولهما إلى النقطة C. وفي (الشكل 12-17 ب) نرى أنّه للوصول إلى النقطة D، على الموجة من المصدر B أن تقطع مسافة أطول من تلك التي تحتاج إليها الموجة من المصدر A. لذلك، فإنّ الموجة من B سوف تتأخر عن الموجة القادمة من A. في هذا الشكل تم اختيار النقطة E بحيث تتساوى المسافتان ED، وAD. لذلك نرى أنّه إذا كانت المسافة BE تساوي طول موجة الصوت تمامًا، فستكون الموجتان تمامًا مختلفتين في الطور عند الوصول إلى النقطة D، وبالتالي يحدث تداخل هدّام. وهكذا، فإنّ هذا يعدّ معيارًا لتحديد أيّ النقاط يكون عندها تداخل هدّام: يحدث التداخل الهدّام عند أيّ نقطة يكون بعدها عن أحد المتكلمَين أكبر من بعدها عن المتكلم الآخر بمقدار نصف طول موجة. لاحظ أنّه إذا كانت هذه المسافة الزائدة BE في (الشكل 12-17أ) تساوي طول موجة كـ$3,2, \cdots \;\; 2, 3, \cdots$، طول الموجة)، فستكون الموجتان في الطور نفسه، ويحدث تداخل بنّاء عند ذلك. ولكن إذا كانت المسافة BE $\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, \;\; 2\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \cdots$ طول موجة، فسيحدث تداخل هدّام.

ومن المهم إدراك أنّ شخصا يجلس عند النقطة D في (الشكل 12-16 أو 12-17) لا يسمع شيئًا على الإطلاق (أو تقريبًا كذلك)، رغم أنّ الصوت يأتي من المتكلمَين الاثنين. في الواقع، إذا توقف أحد المصدرين، فإنّ الصوت من المصدر الثاني سيكون مسموعا بوضوح.

وإذا أطلق أحد المصدرين مدى واسعًا من الترددات، فإنّ أطوالًا موجيةً محدّدةً فقط سوف تتداخل تداخلًا هدّامًا عند نقطةٍ معيّنة.

المثال 12-12 تداخل السماعات

البعد بين سماعتين m 1.00. يقف شخص على بعد m 4.00 من إحداهما. فعلى أيّ بعد من المصدر الآخر يجب أن يكون هذا الشخص للكشف عن تداخلٍ هدّامٍ عندما تُطلق السماعتان صوتًا تردده 1150-Hz؟ افرض أنّ درجة الحرارة 20°C.

النّهج: للكشف عن تداخل هدّام: يجب أن يكون الشخص أقرب أو أبعد بمقدار نصف طول موجة لأحد المصدرين عنه للآخر، أي على بعد $4.00\ \text{m} \pm \lambda/2 =$ ، ويمكننا تحديد λ لأننا نعرف التردد f والسرعة v.

الحلّ: سرعة الصوت عند 20°C هي 343 m/s. لذا، فإنّ طول موجة هذا الصوت هي (معادلة 12-11)

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\ \text{m/s}}{1150\ \text{Hz}} = 0.30\ \text{m}$$

وللحصول على تداخل هدام: يجب أن يكون بعد المستمع مسافة قدرها مره ونصف قدر طول الموجه من احدى السماعتين دون الأخرى أو 0.15m. وهكذا، يجب أن يكون المستمع على بعد 3.85 m من السماعة الثانية.

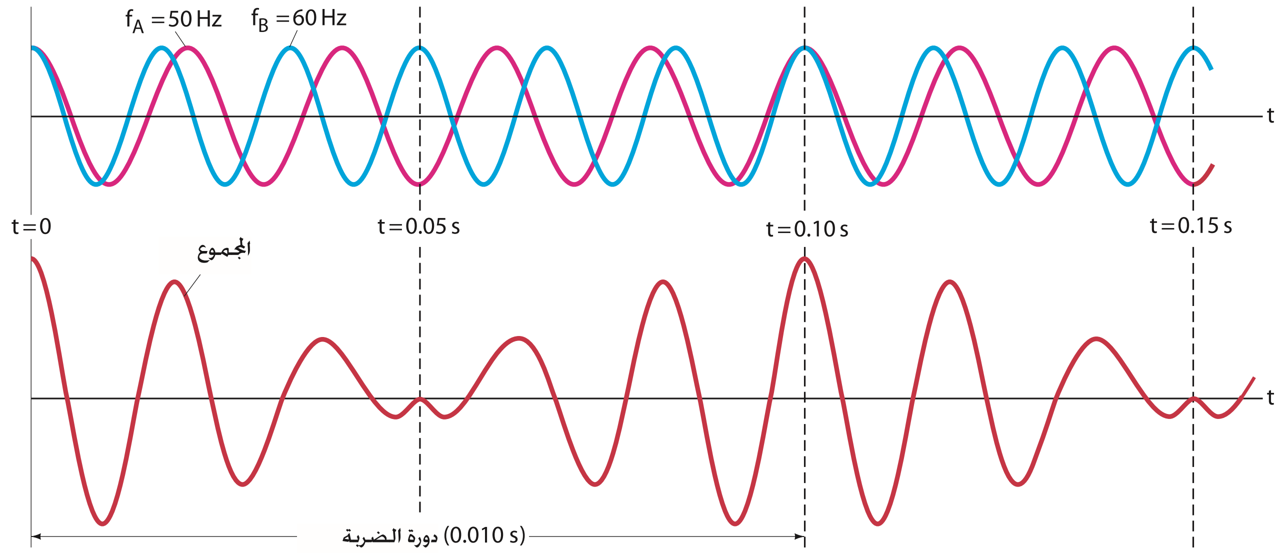
ملحوظة: إذا كانت المسافة بين المصدرين أقلّ من $0.15\ m$، فلن تكون هناك نقطة تبعد أكثر من 0.15 m عن أحد المصدرين عنه للآخر، وسوف لا تكون هناك نقطة يحدث عندها تداخل هدّام.

الضربات – التداخل في الزمن

الضربات

ناقشنا تداخل موجات الصوت الذي يحدث في المكان (الفضاء). وتعدّ ظاهرة الضربات مثالًا مهمًّا ومثيرًا على التداخل في الزمن وهي: إذا كان هناك مصدران للصوت- كشوكتين رنانتين- قريبين في التردد لكنهما غير متساويين، فإنّ الموجات الصوتية الناتجة منهما تتداخل. إنّ مستوى الصوت في مكان معين يرتفع وينخفض بصورة متناوبة في الزمن؛ لأنّ الموجتين تكونان أحيانًا في الطور نفسه، وأحيانًا أخرى مختلفتين في الطور بسبب اختلاف أطوالهما الموجية. تُسَمّى التغيراتُ في الشدة التي تحدث بصورة منتظمة الضربات.

كي ترى كيف تحدث الضربات، خذ موجتين صوتيتين لهما الاتساع نفسه، ولكن تردّد كلٍّ منهما هو $f_A = 50\ \text{Hz}$، و $f_B = 60\ \text{Hz}$ على الترتيب. في ثانية واحدة، يعمل المصدر الأول 50 اهتزازة، أمّا الثاني فيقوم بـ 60 اهتزازة . والآن، تتفحص الموجات عند نقطة تبعد المسافة نفسها عن المصدرين. شكل الموجات كدالة في الزمن، عند مكان معين مبين في (الشكل العلوي 12-18) ، يمثّل الخطّ الأرجواني 50-Hz، في حين يمثّل الخطُّ الأزرق موجة 60-Hz.



الشكل 12-18 تحصل الضربات نتيجة تراكب موجتي صوت بينهما فرق طفيف في التردد.

يبيّن الرسم السفلي في (الشكل 12-18)مجموع الموجتين كدالة في الزمن. عند الزمن $t = 0$، يتضح أنّ الموجتين في الطور نفسه، وتتداخلان تداخلًا بنّاءً. ولأنّ الموجتين تتذبذبان بمعدلين مختلفين عند الزمن $t = 0.05$ s، فستكونان مختلفتين في الطور من جديد، ويكون الاتساع الناتج كبيرا. وهكذا، فإنّ الاتساع الناتج يكون كبيرا كلّ $t = 0.10$ s ويهبط بصورة ملموسة بينهما. وهذا الارتفاع والانخفاض في الشدة هو ما يسمى ظاهرة الضربات* . في هذه الحالة، تتباعد الضربات زمنيا بـ 0.10 s. أي أنّ تردد الضربات هو 0.10 s في الثانية، أو 10 Hz. وهذه النتيجة، أي تردد الضربات، يساوي الفرق في التردد بين الموجتين. وينطبق هذا بصورة عامة.

تردد الضربات = الفرق بين ترددي الموجتين.

يمكن أن تحصل ظاهرة الضربات لأيّ نوع من الموجات، وهي طريقة دقيقة لحساب الترددات. فمثلًا، لتنغيم البيانو: ينصت العازف للضربات بين شوكته الرنانة العيارية ونغمة وتر محدد في البيانو، ويعرف أنهما متناغمان عندما تختفي الضربات. وينغم أعضاء الفرقة الموسيقية (الأوركسترا) أدواتهم بالاستماع للضربات بينهم وبين نغمة عيارية (A عادة فوق C الوسطى عند 440 Hz) الناتجة من البيانو.

تطبيق الفيزياء
ضبط أنغام البيانو

المثال 12-13 الضربات

تصدر شوكة رنانة نغمة ثابتة 400 Hz. عند ضرب هذه الشوكة وتقريبها من وتر قيثار مهتز، تمّ عدّ عشرين ضربة في خمس ثوان. ما الترددات المحتمل الحصول عليها من وتر القيثار المهتز؟

النّهج: كي تحدث الضربات؛ يجب أن يهتّز الوتر عند تردّدٍ يختلف عن 400 Hz بمقدار تردّد الضربات.

الحلّ: تردد الضربات يساوي

$$f_{\text{beat}} = 20 \text{ vibrations}/5 \text{ s} = 4 \text{ Hz}$$

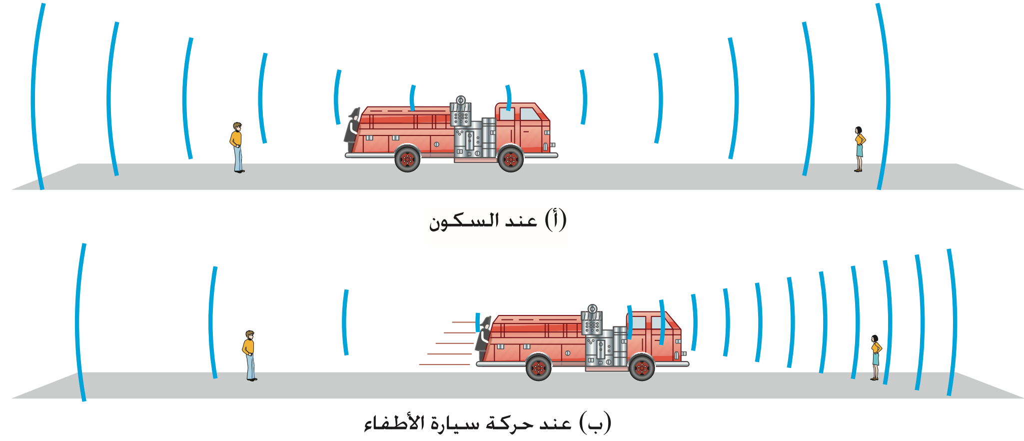
وهذا هو الفرق بين تردّد الموجتين؛ لأنّ إحدى الموجتين معروفة وتساوي 400 Hz. وعليه، يجب أن تكون الثانية 404 Hz أو 396 Hz.

التمرين هـ: ما تردّد الضربات للشوكة الرنانة والقيثار في (المثال 12-13)عندما نسمع الترددين 500-Hz و 506-Hz معا؟

* سوف تسمع الضربات حتى لو لم تكن الاتساعات متساوية، ما دام الاختلاف في التردد ليس كبيرًا.

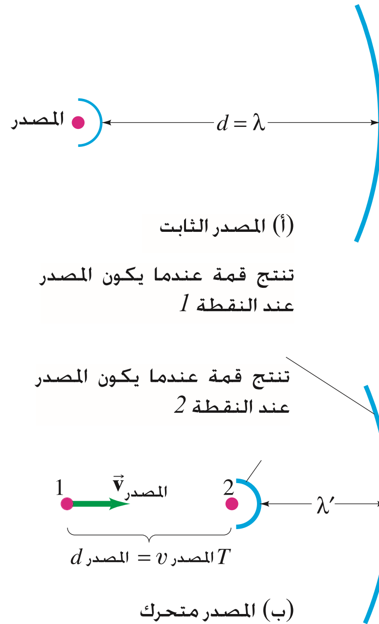
7-12 ظاهرة دوبلر

قد تكون لاحظت أنّك تسمع جرس صوت صفارة الإنذار لسيارة إطفاء مسرعة ينخفض فجأةً عندما تمرّ أمامك. أو ربّما تكون لاحظت التغيّر في جرس (درجة) الصوت لبوق سيارة عند مرورها مسرعة أمامك. وكذلك درجة صوت سيارة سباق عند مرورها أمام المشاهد.عندما يتحرك مصدر الصوت نحو السامع، فإنّ الدرجة التي يسمعها المراقب تكون أكبر ممّا لو كان المصدر ساكنًا. وعندما يكون المصدر متحركًا بحيث يبتعد عن السامع فستكون درجة الصوت أقلّ. هذه الظاهرة تُسَمّى ظاهرة دوبلر* . وتحصل في الموجات جميعها. وسنرى الآن سبب حدوث هذه الظاهرة، ونحسب الفرق بين تردد كلّ من الصوت المسموع والمصدر عندما تكون هناك حركة نسبيه بين المصدر والملاحظ.



الشكل 12-19 (أ) كلا المراقبين يسمعان التردد نفسه من سيارة الإطفاء الساكنة .(ب) ظاهرة دوبلر: السامع الذي تتحرك السيارة نحوه يسمع صوتا ذا تردد أعلى، أما السامع خلف السيارة فيسمع صوتا ذا تردد أقلّ.

الشكل 12-20 تحديد انزياح التردد بظاهرة دوبلر (انظر النص). البقعة الحمراء هي المصدر.



افترض صفارة الإنذار الساكنة التي تصدر صوتًا ذا تردد معين في الاتجاهات جميعها كما هو مبين في (الشكل 12 - 19أ). تسير موجات الصوت بسرعة الصوت في الهواء v_{snd} ، وهي لا تعتمد على سرعة المصدر أو السامع. إذا كان مصدر الصوت (السيارة) متحركًا، فإنّ الصفارة تصدر صوتا عند التردد نفسه كما لو كانت ساكنة. لكن قدمات موجات الصوت التي تطلقها إلى الأمام تكون متقاربة أكثر مما لو كانت السيارة ساكنة، كما هو مبين في (الشكل 12 - 19ب). يعود ذلك إلى أنّ سيارة الإطفاء عندما تتحرك، "تطارد" مقدمات الموجات السابقة، وتطلق كلّ قمة أقرب إلى سابقتها. لذلك، فإنّ السامع على جانب الطريق أمام السيارة سيكشف عن قمم موجات أكثر تمر به في الثانية الواحدة. وهكذا، فإنّ التردد المسموع يكون أكبر. وفي المقابل، تكون مقدّمات الموجات الصادرة خلف السيارة متباعدة أكثر ممّا لو كانت السيارة ساكنة؛ لأنّ السيارة تتسارع مبتعدةً عنها. لذا، تمرّ قمم موجات أقلّ أمام الملاحظ خلف السيارة (الشكل 12 - 19 ب) وتكون درجة الصوت المسموعة أقلّ.

ويمكننا حساب اختلاف التردد المسموع باستعمال (الشكل 12 - 20)، ونفرض أنّ الهواء (أو أيّ وسط آخر) ساكن في مجموعة محاورنا. (المراقب الساكن على اليمين). في (الشكل 12 - 20أ)، مصدر الصوت موضح كبقعة حمراء وهو ساكن. يبين الشكل قمّتي موجة متتاليتين، ولأنّ الثانية أطلقت قبل قليل، فإنها تبدو قريبة من المصدر. إنّ البعد بين هاتين القمتين يساوي λ، طول الموجة. وإذا كان تردد المصدر هو f، فإنّ الزمن بين إصدار الموجتين يكون

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v_{\text{snd}}}$$

في (الشكل 12-20 ب)، المصدر يتحرك بسرعة v_{source} نحو الملاحظ

* نسبة إلى After J. C. Doppler (1803–1853)

تغير التردد، مصدر متحرك ومشاهد ثابت.

في زمن T (كما عرفناه قبل قليل)، أول قمة موجة تكون قد تحركت مسافة $d = v_{الصوت}T = \lambda$ حيث $v_{الصوت}$ هي سرعة موجة الصوت في الهواء (ثابتة، بصرف النظر أكان المصدر متحركًا أم لا). في هذا الوقت نفسه، يتحرك المصدر مسافة T $d_{المصدر} = v_{المصدر}$. لذلك، تكون المسافة بين قمم الموجات، وهي طول الموجة λ' التي يستقبلها الملاحظ

$$\begin{aligned}\lambda' &= d - d_{المصدر}\\ &= \lambda - v_{المصدر}\,T\\ &= \lambda - v_{المصدر}\,\frac{\lambda}{v_{الصوت}}\\ &= \lambda\left(1 - \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)\end{aligned}$$

نطرح λ من جانبي هذه المعادلة، ونجد أنّ الإزاحة في طول الموجة $\Delta\lambda$ ، هي

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = -\lambda\frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}$$

لذا، تتناسب الإزاحة في طول الموجة طرديًا مع سرعة المصدر $v_{المصدر}$ التردد f' الذي سيستقبله الملاحظ الثابت على الأرض، ويعطى بالعلاقة (المعادلة 11-12).

$$f' = \frac{v_{الصوت}}{\lambda'} = \frac{v_{الصوت}}{\lambda\left(1 - \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)}$$

بما أنّ $f = v_{الصوت}/\lambda$، فإنّ

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)} \qquad \text{[المصدر يتحرك نحو الملاحظ الثابت]} \qquad \textbf{(2-12 أ)}$$

ولأنّ المقام أقلّ من 1، فإنّ التردد الظاهري f' يكون أكبر من تردد المصدر f، أي أنّ $f' > f$، فمثلاً، إذا أطلق المصدر صوتًا بتردد 400 Hz عندما يكون ساكنًا، ثم عندما يتحرك المصدر نحو سامع ثابت بسرعة ثابتة 30 m/s، فسوف يسمع الملاحظ ترددا (عند 20°C).

$$f' = \frac{400\ \text{Hz}}{1 - \frac{30\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}} = 438\ \text{Hz}$$

والآن، افترض مصدرًا مبتعدًا عن الشاهد الساكن بسرعة $v_{المصدر}$ باستعمال المناقشة نفسها أعلاه، طول الموجة λ' كما يستقبلها الملاحظ، سيكون لها الإشارة السالبة نفسها على بعد المصدر $d_{المصدر}$ (عند أعلى الصفحة هذه) تتغير للموجة

$$\begin{aligned}\lambda' &= d + d_{المصدر}\\ &= \lambda\left(1 + \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)\end{aligned}$$

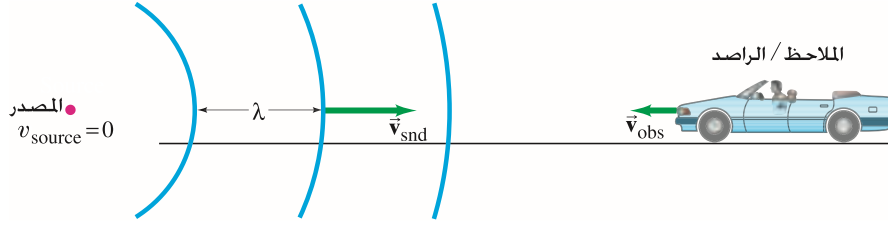
وسيكون الفرق بين الموجات المنبعثة $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = +\lambda(v_{المصدر}/v_{الصوت})$

أما التردد الملاحظ للموجة فسيكون $f' = v_{الصوت}/\lambda'$ وبالتالي

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)} \qquad \text{[المصدر متحرك بعيدا عن الملاحظ الساكن]} \qquad \textbf{(2-12 ب)}$$

إذا كان المصدر يطلق 400 Hz ويتحرك بعيدا عن مشاهد ثابت بسرعة 30 m/s، فسوف يسمع ترددًا

$$f' = (400\ \text{Hz})/[1 + (30\ \text{m/s})/(343\ \text{m/s})] = 368\ \text{Hz}$$



الشكل 12-21 الملاحظ يتحرك بسرعة v_{obs} نحو مصدر ساكن يكشف قمم موجات تعبر بسرعة $v' = v_{snd} + v_{obs}$ حيث v_{snd} هي سرعة الصوت في الهواء.

تغيــر التــردد، مصــدر ثابت، ملاحظ متحرك.

تحصل ظاهرة دوبلر كذلك عندما يكون المصدر ساكنًا والملاحظ متحركًا. إذا كان الملاحظ متحركًا نحو المصدر، فالدرجة المسموعة تكون أعلى من درجة تردد مصدر الصوت. وإذا كان الملاحظ يتحرك بعيدًا عن المصدر، فالدرجة المسموعة تكون أقلّ. ومن الناحية الكمية، يكون التغيّر في التردد مختلفًا عن التغير في حالة المصدر المتحرك. وأمّا في حالة مصدر ثابت وملاحظ متحرك، فإنّ المسافة بين قمم الموجات، أي طول الموجة λ ، لا تتغير. إذا كان الملاحظ متحركا نحو المصدر، (الشكل 12-21)، فالسرعة v' للموجات نسبة إلى الملاحظ هي جمع بسيط للسرعات: $v' = v_{الصوت} + v_{الملاحظ}$، حيث $v_{الصوت}$ هي سرعة الصوت في الهواء (على افتراض أنّ الهواء ساكن) و v_{obs} هي سرعة الملاحظ. لذا، فإنّ التردد المسموع هو

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v_{الصوت} + v_{الملاحظ}}{\lambda}$$

ولأنّ $\lambda = v_{الصوت}/f$، فإنّ

$$f' = \frac{(v_{الصوت} + v_{الملاحظ})f}{v_{الصوت}}$$

أو

$$f' = \left(1 + \frac{v_{الملاحظ}}{v_{الصوت}}\right)f \quad \text{[الملاحظ متحرك نحو المصدر الثابت]} \quad \textbf{(12-3 أ)}$$

وإذا كان الملاحظ متحركًا بعيدًا عن المصدر، فالسرعة النسبية هي $v' = v_{الصوت} + v_{الملاحظ}$

$$f' = \left(1 - \frac{v_{الملاحظ}}{v_{الصوت}}\right)f \quad \text{[الملاحظ يتحرك بعيدا عن المصدر الثابت]} \quad \textbf{(12-3ب)}$$

المثال 12-14 صفارة إنذار متحركة

تطلق صفارة سيارة شرطة ساكنة صفيرًا بتردد 1600 Hz. ما التردد الذي سوف تسمعه إذا كنت ساكنًا وسيارة الشرطة تتحرك بسرعة 25.0 m/s (أ) نحوك؟ (ب) بعيدًا عنك؟

النّهج: بما أنّ الملاحظ ساكن والمصدر متحرك، فسنستعمل (المعادلتين 2.12) . إن التردد الذي تسمعه (الملاحظ) هو التردد المنبعث f مقسوما على المعامل $(1 \pm v_{المصدر}/v_{الصوت})$، حيث $v_{المصدر}$ سرعة سيارة الشرطة. استعمل الإشارة السالبة عندما تقترب السيارة منك (لتعطي ترددًا أعلى)؛ استعمل الإشارة الموجبة عندما تتحرك السيارة بعيدا عنك (تردد أقلّ).

الحلّ: (أ) السيارة تتحرك نحوك، (المعادلة 12-2 أ)

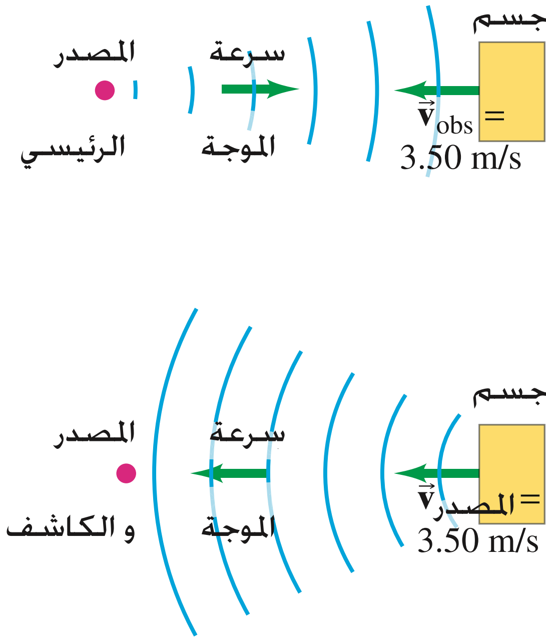
$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)} = \frac{1600\ \text{Hz}}{\left(1 - \frac{25.0\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)} = 1726\ \text{Hz}$$

(ب) السيارة تتحرك بعيدا عنك

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_{المصدر}}{v_{الصوت}}\right)} = \frac{1600\ \text{Hz}}{\left(1 + \frac{25.0\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)} = 1491\ \text{Hz}$$

التمرين و: افرض أنّ سيارة الشرطة في (المثال 12-14)كانت ساكنة وتطلق التردد 1600 Hz. ما التردد الذي سوف تسمعه إذا كنت متحركًا بسرعة 25.0 m/s (أ) نحو السيارة؟ (ب) بعيدًا عنها؟

عندما تنعكس موجةٌ صوتيّةٌ عن حاجزٍ متحرّك، فإنّ تردّد الموجة المنعكسة وبسبب ظاهرة دوبلر سوف يختلف عن تردّد الموجة الساقطة. وهذا موضح في المثال التالي.



الشكل **22-12** مثال 15-12

المثال 15-12 **انزياح دوبلر المزدوج**

تطلق موجة صوتية ذات تردد 5000-Hz من مصدر ساكن. تنعكس هذه الموجة عن جسمٍ يتحرك بسرعة 50 m/s نحو المصدر (الشكل 22-12). ما تردد الموجة المنعكسة عن الجسم المتحرك عند الكشف عنها بواسطة كاشف ساكن قرب المصدر؟

النّهج: في الواقع هناك انزياحان في التردد بسبب ظاهرة دوبلر في هذا الوضع: أولاً، الجسم المتحرك يمثل ملاحظا متحركا نحو المصدر بسرعة $v_{\text{اللاحظ}} = 3.50$ m/s (الشكل 22-12 أ) وبالتالي "يكشف" موجات صوتية ترددها (معادلة 3-12 أ)، $f' = f[1 + (v_{\text{اللاحظ}}/v_{\text{الصوت}})]$ ثانيًا، انعكاس الموجة عن الجسم المتحرك f''، يعني أنّ الجسم يعيد إطلاق الموجة، ويلعب دور مصدر متحرك بسرعة $v_{\text{المصدر}} = 3.50$ m/s، (الشكل 22-12 ب). وهكذا، يكون التردد النهائي الذي يكشف عنه f'، يعطى بالعلاقة الآتية:

$$f'' = f'/[1 - v_{\text{المصدر}}/v_{\text{الصوت}}]$$

الحل: التردد f'، الذي يكشف عنه بالجسم المتحرك هو (معادلة 3-12 أ)

$$f' = \left(1 + \frac{v_{\text{اللاحظ}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)f = \left(1 + \frac{3.50\text{ m/s}}{343\text{ m/s}}\right)(5000\text{ Hz}) = 5051\text{ Hz}$$

الجسم المتحرك الآن "يمكن" (يعكس) ترددا صوتيا (معادلة 2-12 أ):

$$f'' = \frac{f'}{\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} = \frac{5051\text{ Hz}}{\left(1 - \frac{3.50\text{ m/s}}{343\text{ m/s}}\right)} = 5103\text{ Hz}$$

وهكذا ينزاح التردد بـ 103 Hz.

تتداخل كلتا الموجتين الساقطة والمنعكسة في (المثال 12 - 15)، عندما تمتزجان معا (إلكترونيا) وتنتجان الضربات.

تطبيق الفيزياء
مقياس جريان الدم بأثر دوبلر، و استعمالات طبية أخرى

تردد الضربات يساوي الفرق بين الترددين، 103 Hz. تستعمل ظاهرة دوبلر هذه في كثير من التطبيقات الطبية، عادة بالموجات فوق السمعية في مدى ملايين وحدات التردد. فمثلا، الموجات فوق السمعية المنعكسة عن كريّات الدّم الحمراء يمكن أن تحدّد سرعة جريان الدّم. وبصورة مشابهة، يمكن استعمال هذه الطريقة للكشف عن حركة صدر الجنين ورسم نبضات قلبه.

وللسهولة: يمكن كتابة (المعادلتين 2-12 و 3-12) في معادلة منفردة تشمل وللسهولة: يمكن كتابة (المعادلتين 12 - 2 و 12 - 3)في معادلة منفردة تشمل الحالات جميعها عندما يكون كلّ من المصدر والملاحظ في حالة حركة

المصدر و الملاحظ متحركان.

$$f' = f\left(\frac{v_{\text{الصوت}} \pm v_{\text{اللاحظ}}}{v_{\text{الصوت}} \mp v_{\text{المصدر}}}\right) \qquad \textbf{(4-12)}$$

حل المسألة
الحصول على الإشارات الصحيحة.

وللحصول على الإشارات الصحيحة: تذكّر من تجربتك الشخصية أنّ التردد يكون أكبر عندما يقترب المصدر والملاحظ من بعضهما، في حين ينقص عندما يبتعدان. وهكذا، فالإشارات العليا في البسط والمقام تنطبق إذا تحرك المصدر و/ أو السامع نحو بعضهما، أمّا الإشارات السفلية فتنطبق إذا تحركا مبتعدين

*ظاهرة دوبلر في الضوء.

تطبيق الفيزياء
ظاهرة دوبلر في الموجات الكهرمغناطيسية و التنبؤات الجوية.

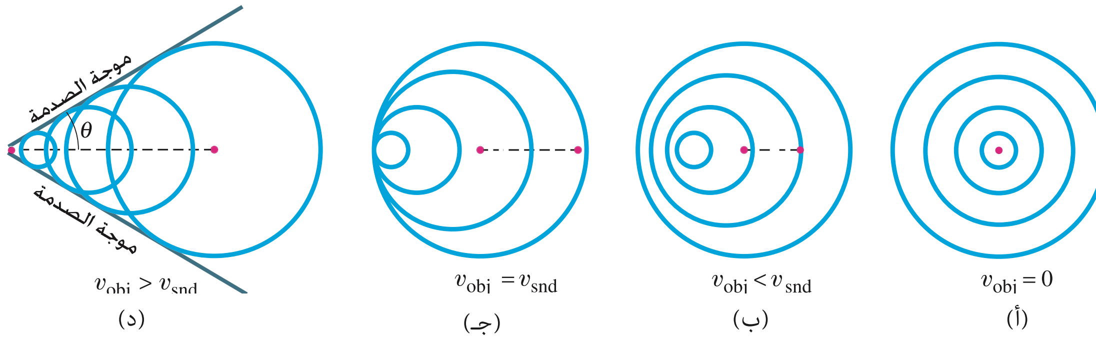
تحدث كذلك ظاهرة دوبلر في الأنواع الأخرى من الموجات. الضوء والأنواع الأخرى من الموجات الكهرومغناطيسية (مثل موجات الرادار) تبدي ظاهرة دوبلر. وعلى الرّغم من أنّ معادلات انزياح التردد ليست (كمعادلتي 12-2 و 12 - 3). كما سنرى في الفصل 33، إلا أنّ الأثر مشابه. ومن التطبيقات المهمة لهذه الظاهرة هو استخدامها في التنبؤات الجوية باستعمال الرادار: فالتأخير في الوقت بين الموجات المرسلة والموجات المستقبلة بعد انعكاسها عن قطرات المطر يعطي موقع الترسب. ويخبرنا قياس انزياح دوبلر في التردد(كما في المثال 15-12) عن سرعة تحرك العاصفة واتجاهها.

تطبيق الفيزياء
الانزياح الأحمر في علم الفلك.

وهناك تطبيقٌ آخر مهمٌّ في الفلك، حيث يمكن تحديد سرعة الأجرام السماوية البعيدة من انزياح دوبلر. ينزاح الضوء من النجوم البعيدة نحو الترددات المنخفضة، مما يشير إلى أنّ هذه النجوم تتحرك بعيدًا عنّا. وهذا مايُدعى **الانزياح الأحمر**؛ لأنّ للأحمر أقلّ تردد في الضوء المرئي. كلّما كان التغير في التردد أكبر، تكون سرعة الابتعاد أكبر كذلك. وقد وجد أنه كلّما كانت الأجرام السماوية بعيدة عنا، فإنها تتحرك بسرعة أكبر بعيدا عنا. إنّ هذه المشاهدة هي الأساس للفكرة القائلة إنّ الكون يتمدد، وكذلك قاعدة للفكرة التي تشير إلى أنّ الكون بدأ بانفجار عظيم يدعى "Big Bang"،(انظر الفصل 44).

* 8-12 موجات الصدمة والدويّ الصوتي

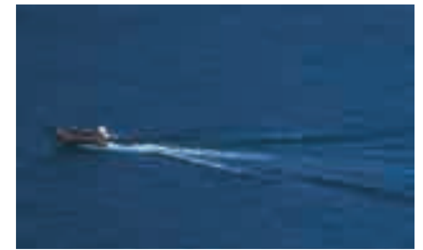
الجسم كالطائرة؛ فالجسم الذي يسير أسرع من الصوت يُقال إنّه يملك سرعةً فوق صوتيةٌ. وتُعطى هذه السرعة **عدد ماخ** * الذي يُعرف كنسبة بين سرعة الجسم إلى سرعة الصوت في الوسط المحيط. مثلا ، طائرة بسرعة 600 m/s عالية في الجو، حيث سرعة الصوت 300 m/s فقط، لها سرعة 2 ماخ.



الشكل 12 - 23 موجات الصوت الصادرة عن جسم (أ) ساكن. أو (ب ، ج ، د) متحرك. (ب) إذا كانت سرعة الجسم أقلّ من سرعة الصوت، تحدث ظاهرة دوبلر. (د) إذا كانت سرعة الجسم أكبر من سرعة الصوت، تتكون موجة الصدمة.

موجات الصدمة

وعندما يتحرك مصدر الصوت بسرعات تحت صوتية (أقلّ من سرعة الصوت)، تتغير درجة الصوت كما لاحظنا (ظاهرة دوبلر)؛ انظر كذلك (الشكل 12 - 23أ و ب). ولكن إذا تحرك المصدر بأسرع من سرعة الصوت فسينتج أثر مثير يعرف بموجة الصدمة. وفي هذه الحالة، فإنّ المصدر "يسبق" الموجات التي ينتجها. كما هو مبين في (الشكل 12 - 23ج)، عندما يسير المصدر بسرعةٍ مساويةٍ لسرعة الصوت، فإنّ مقدمات الموجات التي يطلقها في اتجاه الأمام "تتراكم" مباشرة أمام المصدر. وعندما يتحرك المصدر بسرعة تفوق سرعة الصوت تتراكم مقدمات الموجات فوق بعضها على الجانبين، كما يوضح (الشكل 23- 12ب) . تتراكب قمم الموجات فوق بعضها وتشكّل قمةً واحدةً كبيرةً جدًّا. في الواقع، إنّ موجة الصدمة هي نتيجة تداخل بنّاء لعدد كبير من مقدمات الموجات. وتشبه موجة الصدمة في الهواء موجة القوس لقارب يسير أسرع من موجات الماء التي ينتجها ، (الشكل 12-25) .

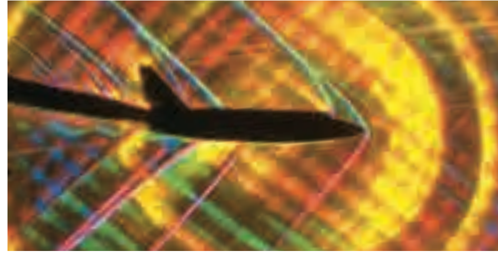


الشكل 12-24 موجات القوس الناتجة من قارب.

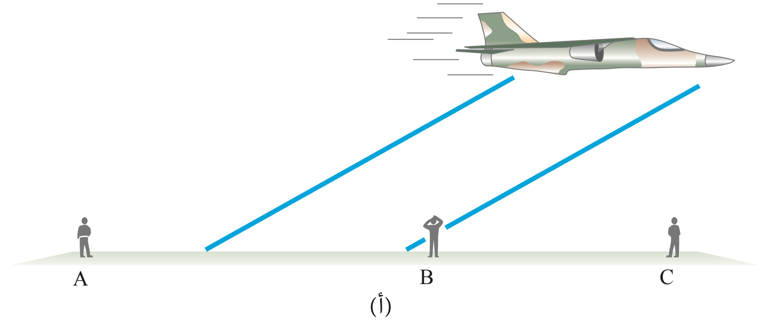
عندما تسير طائرة بسرعات فوق صوتية، فإنّ الضجة التي تحدثها والاضطراب الناجم عنها في الهواء تشكل موجة صدمة تحتوي على كمّ هائل من الطاقة الصوتية. وعندما تمر موجة الصدمة بسامع، فإنّها تُسمع كدويٍّ صوتيٍّ كبير. ويدوم هذا الدوي الصوتي جزءًا من الثانية، ولكنّ الطاقة التي يحملها تكون كافية لكسر زجاج النوافذ، وكذلك العديد من الأعطال والتلف. وفي الحقيقة، فإنّ الدوي الصوتي يتكون من اثنين أو أكثر لأنّ موجات الصدمة يمكن أن تتكون في المقدمة وفي الخلف بالنسبة للطائرة ، وكذلك قرب الجناحين وغيرها، (الشكل 12-25). كذلك موجات القوس في القارب قد تكون متعدّدة أيضًا، كما يمكن مشاهدته في (الشكل 12-24).

تطبيق الفيزياء
الدويّ الصوتي

* نسبة إلى العالِم الفلكي النمساوي ماخ (1838-1916).



(ب)



(أ)

الشكل 12 - 25 (أ) الدوي الصوتي (المزدوج) تم سماعه من قبل الشخص A إلى اليسار، ويسمع الآن من قبل الشخصB في الوسط. وبعد قليل سوف يسمعه الشخص C إلى اليمين. (ب) صورة خاصة لطائرة فوق صوتية تبين موجات الصدمة الناتجة في الهواء. (موجات صدمة متعددة نتجت من الأجزاء المختلفة للطائرة).

عندما تقترب طائرةٌ من سرعة الصوت، فإنّها تواجه حاجزًا من الموجات الصوتية أمامها (انظر الشكل 12 - 23 جـ). ولكي تتجاوز الطائرة سرعة الصوت، فإنّها تحتاج إلى دفع أكبر لتمّر عبر هذا " الحاجز الصوتي". وهذا ما يُسَمّى "اختراق حاجز الصوت". وعندما تتحقّق سرعة فوق صوتية، فإنّ هذا الحاجز لا يعود يشكّل عائقًا للحركة. أحيانًا، يعتقد خطأً أنّ دويًّا صوتيًّا يتشكّل فقط في اللحظة التي تخترق فيها الطائرة حاجز الصوت، ولكن الصحيح هو أنّ موجة صدمة تتبع الطائرة طوال الوقت الذي تطير فيه الطائرة وبسرعة فوق صوتية. سلسلة من الملاحظين على الأرض سوف يسمع كلّ منهم " دويًّا" قويًا عند مرور موجة الصدمة، (الشكل 12 - 25) . تتكون موجة الصدمة من مخروط رأسه عند الطائرة. زاوية هذا المخروط θ، (انظر الشكل 12 - 23 د)، تعطى بـ

$$\sin\theta = \frac{v_{\text{الصوت}}}{v_{\text{الجسم}}} \qquad \textbf{(5-12)}$$

حيث $v_{\text{الجسم}}$ سرعة الجسم (الطائرة)، و $v_{\text{الصوت}}$ سرعة الصوت في الوسط. البرهان متروك للمسألة 63)

* 9-12 تطبيقات: السونار، فوق السمعية، والتصوير الطبي

* السونار

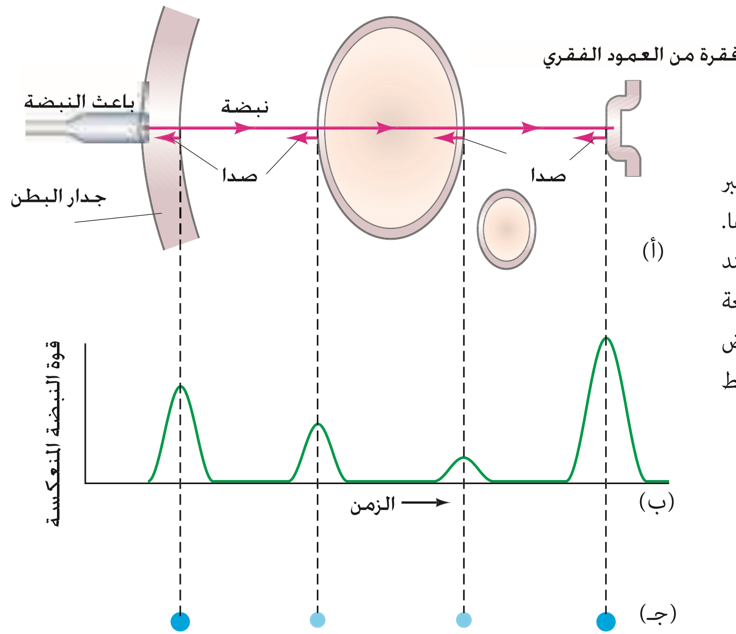
تطبيق الفيزياء
السونار: إيجاد العمق، مسبارات الأرض.

هو انعكاس الصوت، ويستعمل كثيرًا في تحديد المسافات. يستعمل السونار* أو تقانة النبضة- الصدى لتحديد أماكن الأجسام تحت الماء. يرسل المصدر نبضة صوتية خلال الماء، ويستقبل كاشف انعكاسها، أو صداها بعد مضي وقت قصير. تقاس هذه الفترة الزمنية بدقة كبيرة، ومنها تحسب المسافة إلى الجسم العاكس لأنّ سرعة الصوت في الماء معلومة. وتساعدنا هذه الطريقة في تحديد عمق البحر، ومكان السلاسل الصخرية، والسفن الغارقة، والغواصات، أو تجمعات الأسماك. كما أنّ التركيب الداخلي للأرض يدرس بالطريقة نفسها من خلال الكشف عن انعكاسات الموجات التي تتحرك عبر الأرض والتي يكون مصدرها انفجارات (تدعى "مصوتات" أو مسبارات). إنّ تحليل الموجات المنعكسة من تركيبات مختلفة وحدود فاصلة داخل الأرض يؤدي إلى أنماط لخصائص الأرض، كما تفيد أيضا في التنقيب عن النفط والمعادن.

يستعمل السونار عادة ترددات **فوق سمعية**: أي موجات تردداتها أكثر من 20 kHz، خارج نطاق سمع الأنسان؛ لأنّ الترددات النموذجية للسونار تقع بين 20 kHz و 100 kHz.

أحد أسباب استخدام الموجات القصيرة هو أنّ حيودها قليل إضافة إلى أنها غير مسموعة. (البند 11-5) ولذلك تنتشر الحزمة على نحو أقل ويمكن بذلك الكشف عن الأجسام الصغيرة.

* يشير السونار إلى "تحديد المدى في البحار بواسطة الصوت".



الشكل 12-26 (أ) نبضات فوق الصوتية تمرّ عبر البطن، وتنعكس من على السطوح خلال مسارها. (ب) ترسم النبضات المنعكسة كدالة في الزمن عند استلامها من الكاشف. الخطوط العمودية المتقطعة تبين أيّ نبضةٍ منعكسةٍ تعود لأيّ سطح. (ج) عرض البقع للأصداء نفسها: سطوع كلّ بقعة يرتبط بشدة الإشارة.

التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية

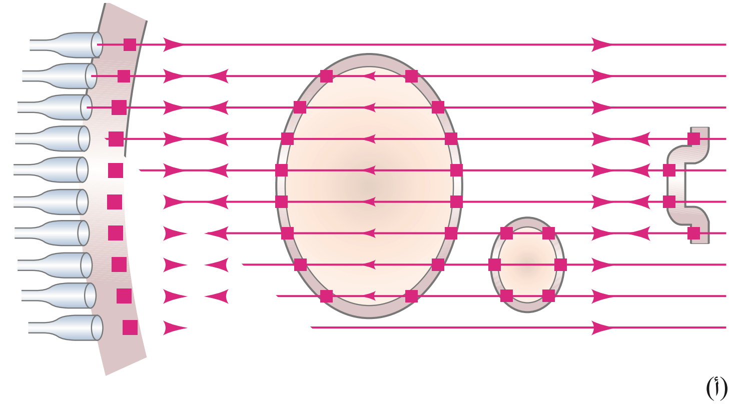
تطبيق الفيزياء
التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية.

الاستعمال التشخيصي للموجات فوق الصوتية في الطب، بصورة أخيلةٍ أحيانًا تُسمّى "صورة صوتية" وهو تطبيقٌ مهمٌّ ومدهشٌ للمبادىء الفيزيائية. تستعمل تقانة **النبضة-الصدى** مثل السونار، ما عدا أنّ الترددات المستعملة تقع في المدى من 1 MHz إلى 10 MHz ($1\ \text{MHz} = 10^6\ \text{Hz}$). تُوَجَّه نبضةٌ صوتيّةٌ ذاتُ ترددٍ عالٍ إلى داخل الجسم، ثم يُكشف على انعكاساتها على الحدود الفاصلة، أو الفواصل بين الأعضاء، أو أيّ أضرار في الجسم، مثل السرطانات، أو أيّ نموٍّ غير طبيعي، أو جيوب سوائل يمكن أيضًا تمييزها؛ ويمكن فحص عمل صمّامات القلب أو تطور الجنين، و كذلك الحصول على معلومات عن الأعضاء المختلفة للجسم، مثل الدماغ، والقلب، والكبد، والكلى. وعلى الرّغم من أنّ الموجات فوق الصوتية لا تحلّ محلَّ الأشعة السينية، إلا أنّ تشخيصها لبعض حالات يكون مساعدًا كبيرًا. وهناك بعض أنواع من الأنسجة أو السوائل لا تستطيع الأشعة السينية الكشف عنها، في حين تقوم الموجات فوق الصوتية بذلك، حيث تنعكس عن جوانبها. صور الموجات فوق الصوتية"الزمن الحقيقي" هي بمثابة شريط سينمائي لجزء من داخل الجسم.

تعمل تقانة النبضة – الصدى للتصوير الطبي كما يلي: تبعث نبضة قصيرة فوق صوتية من محول للطاقة يحول الطاقة الكهربائية إلى نبضة موجة – صوتية. ثم ينعكس جزءٌ من النبضة كصدى عند كلّ حدّ فاصل في الجسم، ومعظم النبضة (عادة) يستمر،
(الشكل 12 - 26 أ) . إنّ الكشف عن النبضات المنعكسة بواسطة الباعث نفسه يمكن عرضه على شاشة عرض أو جهاز عرض. كما أنّ الزمن الذي يمرُّ بين لحظة إرسال النبضة وكلّ جزءٍ منعكس يتناسب مع المسافة عن السطح العاكس. فمثلا، إذا كانت المسافة بين الباعث والعمود الفقري 25 cm، فإنّ النبضة تسير في رحلة ذهاب وإياب مسافة $2 \times 25\ \text{cm} = 0.50\ \text{m}$. إنّ سرعة الصوت في أنسجة جسم الإنسان حوالي 1540 m/s (قريبة من تلك في البحر). لذا، فإنّ الزمن الذي تستغرقه هو

$$t = \frac{d}{v} = \frac{(0.50\ \text{m})}{(1540\ \text{m/s})} = 320\ \mu\text{s}$$

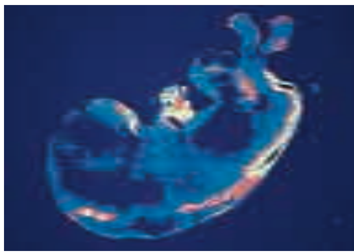
تعتمد شدة النبضة المنعكسة بصورة رئيسة على الفرق في كثافة المادتين على جانبي السطح الفاصل، ويمكن عرضه بصورة نبضة أو بقعة (شكل 12-26 ب، جـ) . ويمكن تمثيل كلّ بقعة صدى (الشكل 12-26 جـ) بنقطةٍ موقعها يعبّر عن زمن الصدى، ولمعانها يعتمد على شدة هذا الصدى. كما يمكن تشكيل صورةٍ في بعدين من خلال هذه البقع لسلسة من المسوحات.



الشكل 12-27 (أ) عشرة خطوط مرّت عبر البطن بتحريك الباحث، أو باستعمال سلسلة من البواعث. (ب) رسمت الأصداء كبقع للحصول على الصورة. الآثار المتقاربة تعطي نتائج مفصلة أكثر.

يتحرك المحوّل، أو يمكن استعمال سلسلة من المحوّلات، كلٌّ منها يرسل نبضته عند كلّ موقع ويستقبل الأصداء كما هو مبين في (الشكل 12 - 27) . كلّ أثر يمكن رسمه، ثم توضع تحت بعضها لتشكل صورة على جهاز عرض كما في (الشكل 12 - 27 ب). تم بيان عشرة خطوط فقط في (الشكل 12 - 27) . لذلك، فالرسم غير واضح. وهناك خطوط أكثر تعطي صورة أكثر دقة* . وهناك صور فوق صوتية مبينة في (الشكل 12 - 28) .





الشكل 12-28 (أ) صورة فوق صوتية لجنين آدمي (رأسه إلى اليسار) داخل الرحم. (ب) صورة فوق صوتية عالية التحليل لجنين. (الألوان المختلفة تمثل أكثر من شدّة مختلفة للنبضات المنعكسة).

* يستعمل رادار الطائرات تقانة مشابهة لتقانة النبضة- الصدى، ما عدا أنّه يستعمل موجات كهرومغناطيسية (EM) تسير بسرعة 3×10^8 m/s كما هو الحال في الضوء.

ملخص

ينتقل الصوت كموجات طولية في الهواء وفي أوساط أخرى. تزداد سرعة الصوت في الهواء مع درجة الحرارة، وعند درجة 20°C، فإنها حوالي 343 m/s.

تتحدد درجة الصوت بواسطة التردد؛ فكلّما زاد التردد زادت الدرجة.

يتراوح مدى السمع عند الإنسان بين 20 Hz إلى 20,000 Hz (1هيرتز = 1 دورة / ثانية).

يتصل علو الصوت أو شدته بمربع اتساع الموجة. ولأنّ أذن الإنسان تستطيع أن تكشف عن شدة الصوت من 10^{-12} W/m² إلى أكثر من 1 W/m²، فإنّ شدة الصوت تحدد على تدريج لوغاريتمي.

مستوى الصوت β يحدد بـ ديسيبل، ويُعرف بدلالة الشدة I بـ:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \textbf{(1-12)}$$

حيث الشدة المرجعية I_0 تؤخذ عادة 10^{-12} W/m².

الآلات الموسيقية هي مصادر بسيطة للصوت حيث تنتج فيها موجات واقفة. قد تهتز الأوتار في الآلات الوترية ككل بوجود عقدتين عند النهايتين فقط. يسمى الترددُ الذي تتكون عنده هذه الموجة الواقفة الترددَ الأساسيَّ. يقابل التردد الأساسي طول موجة مساوٍ لضعف طول الوتر، $\lambda_1 = 2L$. يمكن للوتر كذلك أن يهتز بترددات أعلى تسمى الحل أو التوافقيات، وفيها تتكون عقدة إضافية أو أكثر. تردد كلّ جواب هو عدد صحيح من مضاعفات النغمة الأساسية.

في الآلات الهوائية ، تتكون الموجات الواقفة في العمود الهوائي ضمن الأنبوب.

يكوّن الهواء المهتز في **الأنبوب المفتوح** (مفتوح الطرفين) بطنين للإزاحة عند طرفي الأنبوب. يقابل التردد الأساسي طول موجة تساوي ضعف طول الأنبوب $\lambda_1 = 2L$.

التوافقيات لها ترددات تساوي 1,2,3,4,... مضاعفات التردد الأساسي، مثل الأوتار تماما.

في الأنبوب المغلق (مغلق طرف واحد) يقابل التردد الأساسي طول موجة تساوي أربعة أمثال طول الأنبوب: $\lambda_1 = 4L$. وتوجد الترددات الفردية فقط، وتساوي 1,3,5,7,... مضاعفات التردد الأساسي.

قد تتداخل الموجات الصوتية من مصادر مختلفة. إذا كان هناك صوتان يختلفان قليلا في التردد، يمكن عندها سماع الضربات بتردد يساوي الفرق في تردد المصدرين.

ظاهرة (أثر) دوبلر تعود إلى اختلاف درجة الصوت بسبب حركة المصدر أو السامع. إذا اقترب المصدر والسامع من بعضهما، فإنّ الدرجة المستقبلة تكون أعلى. ولكن إذا تحركا مبتعدين، فستكون الدرجة أقلّ.

[*موجات الصدمة والدوي الصوتي تحدثان عندما ينتقل جسم بسرعة فوق صوتية — أعلى من سرعة الصوت. تستعمل موجات الصوت فوق السمعية (أكبر من 20 kHz) في تطبيقات كثيرة من بينها السونار والتصوير الطبي].

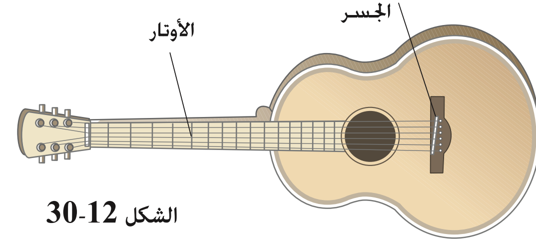
أسئلـــة

1. ما الدليل على أنّ الصوت ينتقل كموجات؟
2. ما الدليل على أنّ الصوتَ شكلٌ من الطاقة؟
3. يلعب الأطفال أحيانًا بهاتف مُصنّع منزليًّا، وذلك بتثبيت خيط في قعر فنجانين من الورق. عندما نشدّ الخيط ويتكلّم طفل في أحد الفنجانين، يمكن سماع الصوت في الفنجان الثاني (الشكل 12-29). فسّر بوضوح كيف ينتقل الصوت من الفنجان الأول إلى الآخر؟



الشكل 12-29 (السؤال 3)

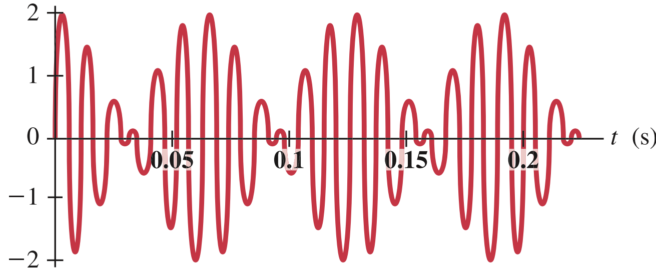
4. عند مرور موجةٍ صوتيّةٍ من الهواء إلى الماء، هل تتوقّع تغيّر التردد أو طول الموجة؟
5. ما دليلك على أنّ سرعة الصوت في الهواء لا تعتمد بصورة ملموسة على التردد.
6. إذا استنشق شخصٌ الهيليوم، فإنّ صوته يبدو عاليًا، لماذا؟
7. كيف تؤثّر درجة حرارة الهواء الغرفة في درجة صوت أنابيب الأرغون؟
8. فسّر كيف يمكن استخدام أنبوب كمرشح لتخفيف الاتساع لترددات صوتية. (كاتم صوت السيارة).
9. لماذا تتقارب عتب القيثار (الشكل 12 - 30) عندما تتحرك على لوحة الأصابع نحو الجسر.

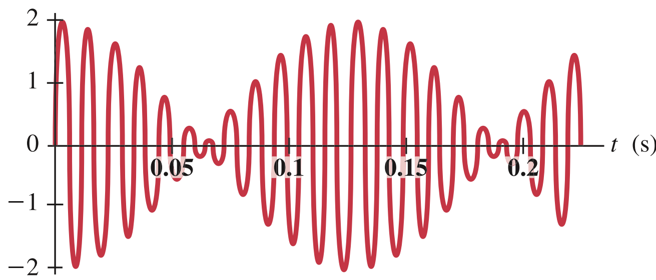


الشكل **30-12**
(السؤال 9).

10. شاحنة ذات ضجيج تقترب منك خلف بناية. في البداية كنت تسمعها دون أن تراها. ولكن عندما تظهر وتراها، فإنّ صوتها يبدو أكثر "وضوحًا"-إنك تسمع جزءًا أكبر من الضجة عالية التردد. فسر ذلك [مساعدة: انظر البند 11 - 15 عن الحيود].
11. يقال إنّ الموجات الواقفة تعود إلى "تداخل الموجات في الحيز" أمّا الضربات فتعود إلى "تداخل الموجات في الزمن". فسّر ذلك.
12. في (الشكل 12 - 16)، إذا تم تخفيض تردد المتكلمين، هل تقترب النقطتان C و D من بعضهما أم تبتعدان (حيث يحصل تداخلان: هدّام وبنّاء؟)
13. تلجأ الطرق التقليدية لحماية سمع الأشخاص الذين يعملون في مناطق ذات مستويات عالية من الضجيج بصورة رئيسة إلى تخفيض مستوى الضجيج. بتقانة جديدة، يضع الأشخاص سماعات أذن لا تحجب الضجة المحيطة. بدلًا من ذلك، تستعمل أداة تكشف عن الضجة وتحولها إلكترونيا، ثم تغذيها إلى السماعات بالإضافة إلى الضجة المحيطة. كيف يمكن لإضافة ضجة أكثر أن تخفض مستويات الصوت التي تصل الأذنين؟

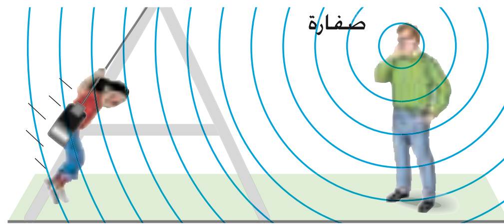
14. افترض الموجتين المبينتين في (الشكل 12 - 31) . يمكن اعتبار كلّ موجةٍ على أنّها مكوّنة من تراكب موجتين صوتيتين بتردد مختلف قليلًا، كما في (الشكل 12 - 18) . في أيٍّ من الموجتين (أ) أم (ب) تكون ترددات الموجتين متباعدة أكثر؟ فسّر ذلك.

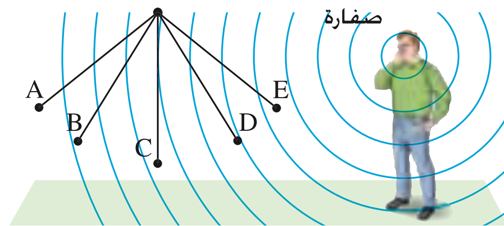




الشكل **31-12** (السؤال 14).

15. هل يحدث انزياح دوبلر إذا كان المصدر والملاحظ يتحركان بالسرعة نفسها و الاتجاه نفسه؟ فسّر ذلك.
16. إذا هبت رياح، فهل سيغيّر ذلك تردّد الصوت الذي يسمعه شخصٌ ساكن بالنسبة إلى المصدر؟ هل تغيّرت السرعة أو طول الموجة؟
17. يبين (الشكل 12 - 32) مواضع مختلفة لطفل في حالة حركة على أرجوحة. يطلق المرشد صفيرًا أمام الطفل على الأرض. في أيّ موقع A إلى E سوف يسمع الطفل أعلى تردّدٍ لصوت الصافرة؟ فسّر تحليلك.





الشكل **32-12** (السؤال 17).

مسائــل

[افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$ وسرعة الصوت في الهواء $v_{snd} = 343\ m/s$، إلا إذا نصّ على غير ذلك.]

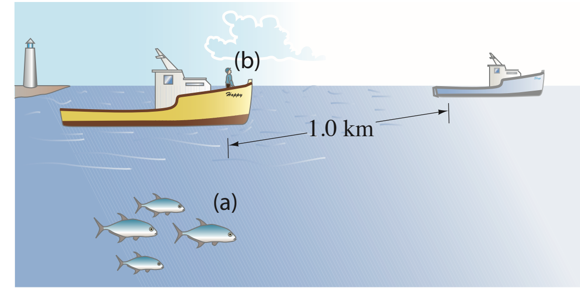
12-1 خصائص الصوت

1. (I) تقيس متنزهة طول بحيرة بالاستماع إلى صدى صرختها المنعكسة عن جرف في النهاية البعيدة للبحيرة. فإذا كانت تسمع الصدى بعد ثانيتين من إطلاق الصرخة. احسب طول البحيرة.

2. (I) يضرب بحّارٌ جانب سفينته مباشرة تحت خط الماء، فيسمع صدى الصوت المنعكس عن أرض المحيط مباشرة في الأسفل بعد 2.5 s. ما عمق المحيط عند هذه النقطة؟ افرض أنّ سرعة الصوت في ماء المحيط هي 1560 m/s (الجدول 12-1) ولا تتغير بصورة ملموسة مع العمق.

3. (I) (أ) احسب الأطوال الموجية في الهواء عند 20°C لأصوات في أقصى مدى السمع للإنسان، 20 Hz إلى 20,000 Hz.(ب) ما طول الموجة لموجة فوق صوتية ترددها 10-MHz؟

4. (II) يتحرك قارب صيد في المحيط فوق مجموعة من سمك التونة في يوم يغطيه الضباب. دون تحذير، حصلت نار خلفية في محرك قارب آخر على بعد 1.0 km (الشكل 12-33). كم يمضي من الوقت قبل أن تسمع النار الخلفية من قبل: (أ) السمك؟ (ب) الصياد؟



الشكل 12 - 33 (المسألة 4).

5. (II) إذا ألقي حجر من قمة جرف، وسُمع صوت ارتطامه بالماء بعد 3.5 s، فما ارتفاع الجرف؟

6. (II) يضع شخص أذنه ملامسة لسطح الأرض، يرى هذا الشخص حجرًا يرتطم بالأرض الأسمنتية. وبعد برهة سمع صوتين من الارتطام؛ أحدهما يسير في الهواء والآخر يسير في الأرض الأسمنتية، والفاصل الزمني بينهما 1.1 s. ما بعد مكان حدوث الارتطام؟ انظر (الجدول 12-1) .

7. (II) احسب الخطأ المئوي على مسافة ميل واحد والناتج من* "قاعدة الخمس ثوان" لتقريب مسافة حدوث البرق إذا كانت درجة الحرارة (أ) 30°C. (ب) 10°C *

12-2 شدة الصوت؛ ديسبل

8. (I) ما شدة الصوت عن مستوى الألم 120 dB؟ قارن ذلك بالهمس 20 dB.

9. (I) ما مستوى الصوت لصوت شدته $2.0 \times 10^{-6}\ W/m^2$؟ *

10. (II) مفرقعتان ناريتان تنتجان مستوى صوت 95 dB إذا اطلقتا في اللحظة نفسها وفي مكان معين، ماذا سيكون مستوى الصوت لو فجرت إحداهما فقط؟ [مساعدة: اجمع الشدة وليس dB]. *

11. (II) يقف شخصٌ على مسافةٍ معيّنةٍ من طائرة بأربعة محركات متساوية الضجيج، وتعطي صوتًا بمستوى حافة الألم، 120* dB. ما مستوى الصوت الذي يعانيه هذا الشخص لو أطفأ قائد الطائرة المحركات ما عدا واحدا؟ [مساعدة : اجمع الشدة وليس الـ dB].

12. (II) مسجل أشرطة يُقال إنّ له نسبة إشارة – ضجيج 58 dB، ولكنها لجهاز CD تساوي 95 dB. ما نسبة شدة الإشارة إلى ضجيج الخلفية لكلّ جهاز؟

13. (II) (أ) بالتقريب، احسب القدرة الناتجة لصوت شخص يتكلم في محادثة عادية. استعمل (الجدول 12-2) . افرض أنّ الصوت ينتشر بانتظام، ويتوزع على كرة مركزها الفم. (ب) ما عدد الأشخاص الذين يلزمون لإنتاج قدرة صوت كلية مقدارها 100 W لمحادثة عادية؟ [مساعدة: اجمع الشدة وليس dB].

14. (II) تضرب موجة صوتية ذات 50-dB طبلة أذن مساحتها $5.0 \times 10^{-5}\ m^2$ (أ) ما مقدار الطاقة الممتصة من الطبلة في الثانية؟ (ب) بهذا المعدل، ما الزمن اللازم لحصول الأذن على طاقة 1J؟

15. (II) المكبر غالي الثمن A قدرته 250 W، أما المكبر الأحدث B فقدرته 40 W.(أ) احسب مستوى الصوت بـ dB الذي تتوقعه عن نقطة تبعد 3.5 m عن سماعة توصل مع كلّ منهما على انفراد. (ب) هل سيكون علو الصوت في المكبر غالي الثمن ضعف علو الصوت من المكبر الأقلّ ثمنا؟

16. (II) في حفل موسيقى الروك، سجل مقياس dB على بعد 2.8 m من سماعة 130 dB.(أ) ما القدرة الناتجة من السماعة بفرض انتشار كروي منتظم للطاقة، وإهمال امتصاص الصوت في الهواء؟(ب) على أيّ بعد سيكون مستوى الصوت معقولًا، 90 dB؟

17. (II) يستطيع الإنسان العادي التمييز بين مستويين في الصوت يختلفان بـ 2.0 dB. ما النسبة بين اتساع صوتين يختلف مستواهما بهذا القدر؟ [مساعدة: انظر البند 11-9].

18. (II) إذا زاد اتساع موجةٍ صوتيّةٍ إلى ثلاثة أمثال قيمته. (أ) بأيّ نسبةٍ ستزداد الشدة؟ (ب) كم dB سوف يزداد مستوى الصوت؟

19. (II) موجتان صوتيتان لهما اتساعا إزاحة متساويان، ولكن تردد إحداهما ضعف تردد الأخرى. ما النسبة بين شدتيهما؟

20. (II) ماذا سيكون مستوى الصوت (dB) لموجة صوتية في الهواء تقابل اتساع إزاحة جزيء مهتز من الهواء 0.13 mm عند 300 Hz؟

* 12-3 ارتفاع الصوت

21. (I) ماذا يجب أن يكون عليه مستوى الصوت لنغمة 6000 Hz لكي يبدو ارتفاعها كنغمة 100 Hz ومستواها 50 dB؟ (انظر الشكل 12-6).

22. (I) ما أقلّ وأعلى ترددين يمكن للأذن سماعهما إذا كان مستوى الصوت 30 dB (انظر الشكل 12 - 6).

23. (II) يستطيع جهازك السمعي أن يتواءم مع مدى هائل من مستويات الصوت. ما النسبة بين أعلى وأخفض شدّتين عند: (أ) 100 Hz؟ (ب) 5000 Hz؟ (انظر الشكل 12 - 6).

12-4 مصادر الصوت؛ الأوتار والأعمدة الهوائية

24. (I) الذبذبة الرئيسية للوتر *a* على آلة الكمان هي 440 Hz وطول الجزء المهتز منه هو 32 cm، وكتلة هذا الجزء هي 0.35 g. ما مقدار الضغط الذي يجب وضعه على هذا الوتر؟ ؟

25. (I) أنبوب أرغون طوله 112 cm. ما تردد النغمة الأساسية والإجابات الثلاث الأولى إذا كان الأنبوب:(أ) مغلق الطرف؟ (ب) مفتوح الطرفين؟

26. (I) (أ) ما تردد الرنين الذي تتوقعة عند النفخ في زجاجة صودا فارغة عمقها 18 cm على فرض أنّها أنبوب مغلق؟ (ب) كيف سيتغير ذلك إذا كان ثلثها مملوءًا بالصودا؟

27. (I) إذا كنت ترغب في صنع أنابيب أرغون مفتوحة بحيث تعطي المدى السمعي للإنسان (20 Hz إلى 20 kHz)، مامدى أطوال الأنابيب المطلوبة؟

28. (II) وتر قيثار مشدود، التردد التوافقي الثالث له 540 Hz. ماذا سيكون تردد النغمة الأساسية إذا استعمل 60% فقط من طوله الأصلي؟

29. (II) طول وتر قيثار 0.73 m، وينغم ليعطي E فوق C الوسطى (330 Hz).(أ) على أيّ بعد من نهاية الوتر يجب أن توضع عتبة القيثار ليعطي نغمة A فوق C الوسطى (440 Hz)؟ (ب) ما طول الموجة لهذا الوتر 440-Hz؟ (جـ) ما تردد الموجة الصوتية الناتجة في الهواء وطولها عند 20°C من هذا الوتر؟

30. (II) (أ) حدّد طول أنبوب أرغون مفتوح يعطي نغمة c الوسطى (262 Hz) عندما تكون درجة الحرارة 21°C. (ب) ما طول الموجة والتردد للنغمة الأساسية للموجة الواقفة في هذا الأنبوب؟ (ج) ما قيمة λ والتردد f للموجة الصوتية المنتقلة في الهواء الخارجي؟

31. (II) أنبوب أرغون في حالة تنغيم عند 20°C. بأيّ نسبة سوف يختلف التردد عند 5.0°C؟

32. (II) على أيّ بعد من مزمار الناي في (المثال 12-10) ستكون الفتحة المكشوفة تعطي D فوق C الوسطى عند 294 Hz؟

33. (II) (أ) عند درجة حرارة $T = 20°C$، ما طول أنبوب أرغون مفتوح لإعطاء نغمة أساسية 294 Hz؟ (ب) إذا ملىء أنبوب بالهيليوم، ماذا سيكون تردد نغمته الأساسية؟

34. (II) أنبوب أرغون خاص يعطي نغمات عند 264 Hz، و 440 Hz، و 616 Hz ولكن بعدم وجود ترددات أخرى بينها. (أ) بين لماذا هذا الأنبوب مفتوح أو مغلق. (ب) ما التردد الأساسي لهذا الأنبوب؟

35. (II) أنبوب منتظم ضيق طوله 1.80 m مفتوح الطرفين. يعطي الترددين المتتابعين 275 Hz، و 330 Hz.(أ) ما النغمة الأساسية له؟ (ب) ما سرعة الصوت في الغاز داخله؟

36. (II) أنبوب في الهواء عند درجة 20°C يراد تصحيحه بحيث يعطي ترددين متتابعين عند 240 Hz، و 280 Hz. ما طول هذا الأنبوب؟ هل الأنبوب مفتوح أم مغلق؟

37. (II) كم جواب موجود ضمن المدى السمعي لأنبوب أرغون طوله 2.14-m ودرجة 20°C إذا كان: (أ) مفتوحًا؟ (ب) مغلقًا؟

38. (III) طول قناة أذن الإنسان حوالي 2.5 cm، وهي مفتوحة للخارج، ومغلقة عند النهاية الأخرى بواسطة غشاء الطبلة. احسب الترددات (في مدى السمع) للموجات الواقفة في قناة الأذن. ما علاقة إجابتك مع المعلومات الموجودة في (الشكل 1-6)2؟

6-12 التداخل؛ الضربات

39. (I) عازف بيانو يسمع ضربةً واحدةً كلّ ثانيتين عند محاولته ضبط وترين، أحدهما يطلق صوتًا بتردد 440 Hz. ما بعد الوتر الآخر من حيث التردد؟

40. (I) ماتردد الضربات عند عزف النغمتين (262 Hz)، و C# (277 Hz) معا؟ ماذا لو عزفت كلّ منهما بتردد أقلّ بمعامل يساوي 4؟

41. (I) صفارة كلب تعمل على 23.5 kHz، ولكن هناك صفارة أخرى (موسومة X) تعمل على تردد غير معلوم. فإذا كانتا غير مسموعتين من الإنسان عندما تعملان منفردتين، ولكن عواءً حادًا تردده 5000 Hz يحدث عندما تعملان معًا، احسب تردد الصفارة الموسومة X.

42. (II) وتر قيثار ينتج 4 ضربات/ ثانية عندما يعمل مع شوكة رنانة ترددها 350 Hz، في حين يعمل 9 ضربات/ ثانية إذا عمل مع شوكة رنانة ترددها 355 Hz. ما تردد الوتر؟ فسر استنتاجك.

43. (II) وترا قيثار نغما ليعطيا التردد 294 Hz نفسه، تم إنقاص الشد في أحدهما بنسبة 2.0%. ماذا سيكون تردد الضربات عندما يعزفان معًا؟ [مساعدة: تذكّر المعادلة 11-13].

44. (II) ماعدد الضربات التي سوف تسمع عند عمل نايَيْن متشابهين كلّ منهما تعزف 262 Hz، لكن إحداهما عند 5.0°C، والأخرى عند 25.0°C؟

45. (II) لديك ثلاث شوكات رنانة؛ A، B و C. الشوكة B ترددها 441 Hz، وعند عمل A،B معا يسمع تردد ضربات 3 Hz. ولكن عند عمل B و C معا يكون تردد الضربات 4 Hz. ما الترددات الممكنة لـ A و C؟

46. (II) البعد بين سماعتين 1.80 m. يقف شخص على بعد 3.00 m من إحداهما و 3.50 m من الأخرى.(أ) ما أقلّ تردد يحدث عنده تداخل هدّام في هذا المكان؟(ب) احسب ترددين آخرين يحدث عندهما تداخل هدّام في هذا المكان(أعط الترددين الأعلى). افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$.

47. (III) وترا بيانو يفترض أنّ لهما التردد 132 Hz نفسه، لكن عازف بيانو يسمع ثلاث ضربات كلّ ثانيتين عند عزفهما معا. (أ) إذا عزف أحدهما 132 Hz، فماذا يجب أن يكون تردد الآخر (هل هناك جواب واحد)؟(ب) بكم (نسبة مئوية) يجب زيادة الشد أو إنقاصه ليصبحا متناغمين؟

48. (III) مصدر صوتي يطلق صوتا طول موجة 2.64 m و 2.76 m في الهواء. كم عدد الضربات التي ستسمع في الثانية ؟ (افرض $T = 20°C$).

7-12 ظاهرة دوبلر

49. (I) التردد المتوسط لصفارة إنذار سيارة إطفاء هو 1550 Hz في حالة السكون. ما التردد الذي تستقبله إذا تحركت بسرعة 30.0 m/s (أ) نحو سيارة الإطفاء؟ (ب) بعيدًا عن سيارة الإطفاء؟

50. (I) إذا كنت تقف ساكنًا، ما التردد الذي تستقبله لصفارة إنذار إطفائية تطلق صفيرًا بتردد 1550 Hz إذا تحركت بسرعة 32 m/s (أ) نحوك؟ (ب) بعيدا عنك؟

51. (II) (أ) قارن الانزياح في التردد إذا كان هناك مصدر صوتي بتردد 2000 Hz يسير نحوك بسرعة 15 m/s، مقابل تحركك نحوه بسرعة 15 m/s. هل الترددان متساويان تماما؟ هل هما قريبان؟(ب) أعد الحسابات لسرعة 150 m/s ثم 300 m/s . ماذا تستنتج حول عدم تماثل نتائج أثر دوبلر؟

52. (II) سيارتان، كلّ منهما مزودة ببوق ذي تردد منفرد ومتماثلين. عندما تكون إحداهما ساكنة والأخرى تتحرك نحوها بسرعة 15 m/s، فإنّ السائق الساكن يسمع ضربات بتردد 5.5 Hz، فما التردد الذي يطلقة كلّ بوق؟ $T = 20°C$.

53. (II) وطواط ساكن يطلق موجات فوق صوتية بتردد 50.0 kHz، ويستقبلها مرتدة من جسم يتحرك مباشرة بعيدا عنه وبسرعة 25 m/s. ما تردد الصوت الذي يستقبله الوطواط؟

.54 (II) وطواطٌ يطير نحو جدارٍ بسرعة 5.0 m/s، وفي أثناء طيرانه يصدر الوطواط موجاتٍ فوق صوتيّةٍ بتردّد 30.0 kHz، ما التردّد الذي يسمعه الوطواط في الموجات المنعكسة؟

.55 (II) في إحدى تجارب دوبلر الأصلية، عزف بوقٌ بتردد 57 zH على عربة قطار مفتوحة متحركة، وعزف بوق مماثل بالنغمة نفسها في محطة القطار. ما تردد الضربات المسموع إذا اقتربت عربة القطار من المحطة بسرعة 10.0 m/s؟

.56 (II) مقياس جريان دوبلر يستخدم موجات فوق صوتية لقياس سرعة جريان الدم.افرض أنّ الجهاز يطلق صوتا بتردد 3.5 MHz، وسرعة الصوت في أنسجة جسم الإنسان 1540 m/s. ما تردد الضربات المتوقع إذا كان الدم يتدفق في أوردة القدم بسرعة 2.0 cm/s بعيدا عن مصدر الصوت؟

.57 (III) يستخدم أثر دوبلر باستعمال موجات فوق صوتية بتردد 2.25×10^6 Hz لعرض نبضات القلب لجنين. لوحظ (أقصى) تردد ضربات 500 Hz. بفرض أنّ سرعة الصوت في الأنسجة 1.54×10^3 m/s، احسب أقصى سرعة لسطح القلب النابض.

.58 (III) تطلق صفارة مصنع صفيرا بتردد 570 Hz عندما تكون سرعة الرياح من الشمال 12.0 m/s، ما التردد الذي يسمعه العاملون وهم ساكنون في موقعهم (أ) إلى الشمال من الصفارة؟ (ب) إلى جنوبها؟ (جـ) إلى شرقها؟ (د) إلى غربها؟ ما التردد الذي يسمعه راكب دراجة يتجه (هـ) نحو شمالها (و) نحو غربها بسرعة 15.0 m/s؟ افرض درجة الحــرارة $T = 20°C$.

* 8-12: موجات الصدمة؛ الدويّ الصوتي

***.59** (I) (أ) ما السرعة التي يتحرك بها جسم على الأرض إذا كانت سرعته عند 20°C هي 0.33 ماخ (ب) نفاثة تطير بسرعة 3000 km/h تعطي عدد ماخ يساوي 3.2 على الشاشة. ما سرعة الصوت عند هذا الارتفاع؟

***.60** (II) طائرةٌ تنتقل بـ 2.3 ماخ حيث سرعة الصوت تساوي 310 m/s. (أ) ما قيمة الزاوية التي تعملها موجة الصدمة مع اتجاه حركة الطائرة؟ (ب) إذا كانت الطائرة تحلّق على ارتفاع 7100 m، ما الزمن اللازم مروره كي يسمع شخص على الأرض موجة الصدمة في حال أنها فوقه مباشرة؟

***.61** (II) مركبة فضائية تدخل الغلاف الجوي الرقيق لكوكب حيث سرعة الصوت 35 m/s. (أ) ما قيمة عدد ماخ المركبة إذا كانت سرعتها 15,000 km/h؟ (ب) ما زاوية موجة الصدمة نسبة إلى اتجاه الحركة؟

***.62** (II) نيزك يسير بسرعة 8500 m/s يصطدم بالمحيط. احسب زاوية موجة الصدمة التي ينتجها (أ) في الهواء قبيل دخوله المحيط. (ب) في الماء بعد دخوله مباشرة. افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$.

***.63** (II) بيّن أنّ الزاوية θ التي يكوّنها الدويّ الصوتيُّ مع اتجاه نفاثة فوق صوتية يعطى (بالمعادلة 12-5).

***.64** (II) تنظر رأسيًّا نحو الأعلى لرؤية طائرة على ارتفاع 1.5 km فوق الأرض تطير بسرعة أكبر من سرعة الصوت. عند زمن سماعك دوي الصوت، تكون النفّاثة قد تحرّكت مسافةً أفقيّةً 2.0 km. انظر (الشكل 12-34). احسب: (أ) زاوية مخروط الصدمة θ. (ب) سرعة النفاثة (عدد ماخ). افرض أنّ سرعة الصوت 330 m/s.

الشكل 12-34 (مسألة 64)

مسائل عامة

.65 يستعمل صائد سمك السونار الذي يرسل نبضاتٍ صوتيّةً تردّدها 20,000-Hz نحو الأسفل من قاعدة قاربه، ثم يكشف الصدى. إذا كان أكبر عمق مصمم للعمل به هو 200 m، فما أقلّ وقت بين النبضات (في الماء العذب)؟

.66 تقريبا، كم أوكتافا (ثمانية) في مدى السمع عند الإنسان؟

.67 يحتوي معرض للعلوم على سمفونية أنابيب تتكون من أنابيب بلاستيكية عديدة بأطوال مختلفة ومفتوحة الطرفين إذا كانت أطوالها 3.0 m,2.5 m,2.0 m,1.5 m,1.0 m 3.0 m, 2.5 m, 2.0 m, 1.5 m (أ) فما الترددات التي تسمعها أذن زائر يضع أذنه قرب نهاية الأنابيب؟ (ب) لماذا يعمل هذا النظام بصورة أفضل في يوم صاخب عنه في يوم هادىء؟

.68 تصدر بعوضة على بعد 5.0 m من شخص صوتًا قريبًا من عتبة السمع للإنسان (0 dB). ماذا سيكون مستوى الصوت الناتج من 1000 بعوضة من هذا النوع؟

.69 ما محصلة مستوى الصوت عندما نسمع معًا صوتًا مستواه 82-dB، وآخر مستواه 87-dB؟

.70 مستوى الصوت على بعد 12.0 m من سماعة في العراء هو 105 dB. ما القدرة الصوتية (W) لهذه السماعة بفرض أنّها تطلق الصوت بانتظام في الاتجاهات كافة؟

.71 مكبر مسجّلة(ستيريو) معدل الطاقة الناتجة له 150 W عند تردد 1000 Hz. تقل القدرة بمقدار 10 dB عند تردد kHz 15. ما مقدار القدرة بالواط عند تردد 15 kHz؟

.72 يستخدم العاملون حول طائرة نفاثة عادةً واقيات لآذانهم. افرض أنّ مستوى الصوت لمحرك النفاثة على بعد 30 m هو 140 dB، وأنّ نصف القطر المتوسط لفتحة أذن الإنسان هي 2.0 cm. ما القدرة التي ستتلقاها أذن غير محمية على بعد 30 m من المحرك؟

.73 في الصوتيات والاتصالات يعرف الكسب، β، بـ (ديسيبل) كما يلي :

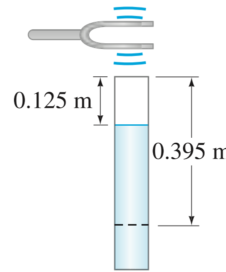
$$\beta = 10 \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

حيث p_{in} قدرة الدخل للنظام، وP_{out} قدرة الخرج. يعطي جهاز مسجّلة(ستيريو) 100 W من القدرة مقابل قدرة الدخل 1mW. فما هو الكسب بـ dB؟

74. كلّ وتر في الكمان ينغم إلى تردّدٍ يساوي $1\frac{1}{2}$ مرّة من تردّد الوتر المجاور. سوف توضع الأوتار الأربعة متساوية الطول تحت الشد نفسه. ماذا ستكون كتلة وحدة الأطوال لكلّ وتر نسبة إلى أقلّها كثافة؟

75. طول الوتر A في الكمان 32 cm، ويقع بين نقطتين ثابتتين وبتردد طبيعي 440 Hz، وكتلة وحدة أطوال 6.1×10^{-4} kg/m. (أ) ما سرعة الموجة والشّدّ في الوتر؟ (ب) ماذا سيكون طول الأنبوب (مثل أنبوب أرغون) مغلق الطرف الذي تردده الأساسي 440 Hz إذا كانت سرعة الصوت في الهواء 343 m/s؟ (ج) ماذا سيكون تردد الجواب الأول لكلّ من الآلتين؟

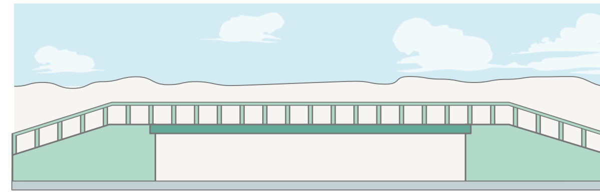
76. تهتز شوكة رنانة فوق أنبوب عمودي مفتوح ومملوء بالماء (شكل 12-35) يسمح لمستوى الماء بالانخفاض تدريجيّا. خلال ذلك، يسمع عمود الهواء فوق سطح الماء ويعمل رنينا مع الشوكة الرنانة عندما تكون المسافة من فوهة الأنبوب إلى سطح الماء 0.125 m وكذلك عند 0.395 m. ما تردد الشوكة الرنانة؟



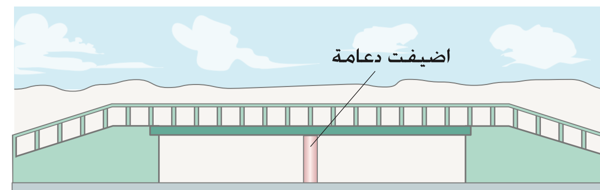
الشكل 12-35
مسألة 76

77. وتر قيثار طوله 75 cm وكتلته 2.10 g بالقرب من أنبوب مفتوح الطرف وطوله كذلك 75 cm. ما مقدار الشّدّ في الوتر إذا كان عليه أن يعمل رنينًا (في موجته الأساسية) مع التوافقي الثالث للأنبوب؟

78. لوحظ أنّ جسرًا فوق طريق سريع يهتز كحلقة كاملة ($\frac{1}{2}\lambda$) عندما تؤثر هزة أرضية بسيطة ترددها 4.0 Hz. وضعت مصلحة الطرق السريعة دعامة في منتصف الجسر كما هو مبين في (الشكل 12-36). ما تردد الرنين الذي تتوقعه للجسر الجديد؟ الهزات الأرضية نادرا ما تعمل اهتزازًا للجسور فوق 5 Hz أو 6 Hz. هل التعديل الذي تم إجراؤه كان مناسبا؟



قبل التعديل



بعد التعديل

الشكل 12-36
مسألة 78

79. سمع شخصٌ نغمةً نقيّةً في المدى 500–1000-Hz آتيةً من مصدرين. يكون الصوت أعلى ما يمكن عند نقاط تبعد المسافات نفسها من المصدرين. ولتحديد التردد بالضبط؛ تجول الشخص ليجد أنّ مستوى الصوت يكون أقلّ ما يمكن عند نقطة تبعد عن المصدر الأول بمقدار 0.34 m أكثر من بعدها عن المصدر الثاني. فما تردد الصوت؟

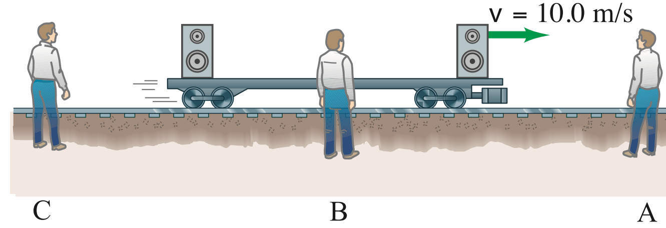
80. يطلق قطاران صفارتيهما بتردد 424-Hz، أحد القطارين ساكن. يسمع المرشد في القطار الساكن تردد ضربات 3.0 Hz عند اقتراب القطار الآخر. فما سرعة القطار المتحرك؟

81. تردد صفارة قطار بخاري 538 Hz، عند اقترابه منك وبعد مروره بك يقاس تردده بـ 486 Hz. ما السرعة التي كان يتحرك بها القطار؟ (افرض أنّ السرعة ثابته).

82. على مسار سباق، يمكنك تخمين سرعة السيارات بواسطة الفرق في درجة صوت محرك السيارة بين السيارات المقتربة والمبتعدة. افرض أنّ إحدى السيارات انخفض صوتها بثماني كامل (أوكتاف)(انتصف ترددها) عند مرورها على طريق مستقيم. ما السرعة التي كانت تسير بها؟

83. أنبوبا أرغون مفتوحان، يصدران صوتًا معًا، وينتج تردد ضربات 11 Hz. إذا كان طول الأنبوب الأقصر 2.40 m، فما طول الآخر؟

84. سماعتان عند طرفي عربة قطار يمر أمام ملاحظ ساكن بسرعة 10.0 m/s، كما هو مبين في (الشكل 12-37). إذا كان تردد السماعتين متساويا 212 Hz، فما تردد الضربات الذي يسمعه الملاحظ عندما: (أ) يسمع من الموقع A أمام العربة؟ (ب) يقف بين السماعتين، عند B؟ (ج) يسمع السماعتين بعد مرورهما أمامه عندC؟



الشكل 12-37
(مسألة 84)

85. إذا كانت سرعة جريان الدم في الأوردة الدموية حوالي 0.32 m/s، ما تردد الضربات الذي تتوقعة من موجات فوق صوتية ترددها 5.50-MHz التي تم توجيهها على امتداد الجريان وانعكست عن كريات الدم الحمراء؟ افرض أنّ الموجات تسير بسرعة 1.54×10^3 m/s

86. يطير وطواط نحو فراشة بسرعة 6.5 m/s، في حين تطير الفراشة نحو الوطواط بسرعة 5.0 m/s. يطلق الوطواط موجة صوتية تردّدها 51.35 khz. ما تردّد الموجة التي يستقبلها الوطواط بعد انعكاسها عن الفراشة؟

87. يطلق وطواط سلسلة من النبضات الصوتية عالية التردّد عند اقترابه من فراشة. الفترة الزمنية بين النبضات هي 70.0 ms، وطول الفترة الزمنية للنبضة 3.0 ms. ما البعد الذي ستكون عنده الفراشة، والذي يمكّن الوطواط من إيجادها بحيث يعود الصدى من كلّ صرخة قبل إطلاق الصرخة التالية له؟

.88 استعمل البوق الألبيّ (شكل 12-38) مرّةٍ لإرسال إشارات من قرية ألبيّة إلى أخرى . وبما أنّ الترددات المنخفضة للأصوات أقلّ قابليّة لفقد الشدة (الطاقة) فقد استعملت أبواقٌ طويلةٌ للحصول على أصواتٍ عميقة. عند استعمال هذه الأبواق كآلات موسيقية، يجب أن ينفخ في البوقٍ بحيث يعمل أحد الحل فقط رنيناً. أكثر الأبواق الألبية شعبيّةً طوله حوالي 3.4 m، ويُسَمّى F الحاد (أو G المنبسط) . ما الترددّ الأساسيُّ لهذا البوق؟ وأيُّ جوابٍ قريبٍ من F الحاد؟ (انظر الجدول 12-3) افرض أنّه أنبوب مفتوح.



الشكل 12-38
(مسألة 88).

.89 صوتيّات الغرفة لسماع (ستيريو) يمكن تسويته بوجود موجاتٍ واقفة تسبّب " بقعًا ميتة" صوتيًّا عند مواقع عقد الضغط. افترض غرفة معيشة طولها 5.0 m وعرضها 4.0 m وارتفاعها 2.8 m. احسب الترددّات الأساسيّة للموجات الواقفة في هذه الغرفة؟

.90 هناك عرضٌ تمثيلي يُسَمّى" القضبان المغنية"، يحتوي على قضيب ألمنيوم طويل ورفيع ليقبض باليد عند منتصفه. يطرق القضيب باليد الأخرى. وبتمرين قليل نجعل القضيب "يغني" أو يطلق رنينًا واضحًا عاليًا. القضيب طوله 90-cm . (أ) ما التردد الطبيعي للصوت؟ (ب) كم طول الموجة في قضيب الألمنيوم؟ (ج) كم طول الموجة الذي ينتقل في الهواء عند 20°C؟

.91* شدة الصوت عند عتبة السمع لأذن الإنسان عند تردد 1000 Hz هي $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$، حيث β مستوى الصوت تساوي 0 dB. وعتبة الألم عند التردد نفسه حوالي 120 dB، أي $I = 1.0\ \mathrm{W/m^2}$ وهو ما يقابل زيادة في شدة الصوت بمعامل 10^{12}. بأيّ معامل يتغير اتساع الإزاحة A؟

.92* تسير طائرة بسرعة Mach 2.0. يسمع ملاحظ على الأرض الدويّ الصوتي بعد 1.5 min من مرور الطائرة مباشرة فوق رأسه. ما ارتفاع الطائرة؟

.93* أثر قارب سريع يعمل زاوية 15° في بحيرة سرعة موجة الماء هي 2.2 km/h. احسب سرعة القارب.

إجابات التمارين

أ: 1 km لكلّ ثلاث ثوانٍ قبل سماع صوت الرعد.

ب: 4 مرات أكثف.

جـ: ربع القيمة الأصلية: 6 dB.

د: 257 Hz

هـ: 6 Hz

و: (أ) 1717 Hz ؛ (ب) 1483 Hz



إنّ تسخين الهواء داخل بالون "الهواء الساخن" يرفع درجة حرارة الهواء، ويؤدّي إلى تمدّده وإجباره على الخروج من الفتحة السفلية. كما أنّ نقص الهواء في الداخل يعني أنّ كثافته أقلّ، أي أنّ هناك قوّةُ طفو (قوّة دفع) محصلة نحو الأعلى على البالون.

سندرس في هذا الفصل درجة الحرارة وأثرها في المادة؛ التمدّد الحراريّ وقوانين الغازات. ويُعدّ قانون الغاز المثالي والتعبير عنه بدلالة الجزيئات الأكثر أهمية .

الفصل 13

درجة الحرارة ونظرية الحركة

إنّ هذا الفصل هو الأول من ثلاثة فصول (13، 14، 15) مكرّسةً لمواضيع ذات علاقة ببعضها هي: درجة الحرارة، والحرارة، والديناميكا الحرارية. وسيخصص غالبية هذا الفصل لتمحيص نظرية أنّ المادة مبنية من ذرّات، وأنّ هذه الذرّات في حركة عشوائية مستمرة. وتُسَمَّى هذه النظريّة "نظريّة الحركة".

كما سنناقش أيضًا مفهوم درجة الحرارة وكيفية قياسها، بالإضافة إلى الخصائص المقيسة تجريبيًّا للغازات التي تخدم تأسيس نظرية الحركة هذه.

1-13 النظرية الذرية للمادة

النظرية الذرية – الدليل.

تعود فكرة أنّ المادة مكوّنةٌ من ذرّات إلى قدماء الإغريق. حيث رأى الفيلسوف الإغريقي ديموقريتوس أنّه إذا قطعت قطعة صغيرة من مادة نقيّةٍ- مثلًا قطعة حديد – إلى قطع أصغر فأصغر، فستصل أخيرًا إلى قطعةٍ لا يمكن تقسيمها أكثر. تُسَمَّى هذه القطعة **الذرة**، والتي تعني بالإغريقية "غير قابلة للانقسام".*

لقد أصبحت النظريّة الذريّة اليوم مقبولةً بصورةٍ عامّة. أمَّا الدلائل التجريبية التي تؤكّدها، فقد برزت في القرون؛ الثامن عشر والتاسع عشر، والعشرين، وكثيرٌ منها تمّ الحصول عليه من تحليل التفاعلات الكيميائية.

* اليوم لا ينظر إلى الذّرة على أنّها غير قابلة للانقسام، بل إنّها تتكوّن من النواة (تحتوي بروتونات ونيوترونات) والإلكترونات.

الكتل الذرية و الجزيئية

سوف نتكلّم كثيرًا عن الكتل النسبيّة للذرّات والجزيئات؛ أي ما نسمّيه **الكتلة الذريّة** أو **الكتلة الجزيئيّة**، على الترتيب.* وتُعدّ هذه أساسًا على اختيار ذرّة نظير الكربون ^{12}C وتعيين قيمة 12.000 **وحدة كتلة ذرية** (u) لها. وبدلالة الكيلوغرام

$$1\ u = 1.6605 \times 10^{-27}\ kg$$

وهكذا تكون الكتلة الذرية للهيدروجين 1.0078 u، وقيم ذرات أخرى مبوّبة في الجدول الدوري للعناصر داخل الغلاف الخلفي لهذا الكتاب، وكذلك في(الملحق ب). وتُعرّف الكتلة الجزيئية لمركب ما بأنّها مجموعة الكتل الذرية المكونة لجزيئات ذلك المركب.**

إنّ الجزء المهمّ من الأدلة على النظرية يُعرف **بالحركة البراونية**، نسبةً إلى عالم الأحياء روبرت براون الذي اكتشفها عام 1827. عندما كان براون يلاحظ حبوب اللقاح المعلّقة في الماء تحت مجهره، لاحظ أن الحبوب الدقيقة تتحرك في مسارات متعرجة (الشكل 13 - 1)، رغم أنّ الماء كان ساكنًا تمامًا. تُفسّر النظرية الذرية الحركية البراونية بسهولة إذا أخذنا الفرض المعقول بأنّ ذرات أيّ مادة في حالة حركة مستمرة. عند ذلك فإنّ حبوب اللقاح الدقيقة تُدفع للتحرك بفعل حركة جزيئات الماء.

الشكل 13 - 1 مسار جسيم دقيق (حبوب لقاح مثلا) معلق في الماء. الخطوط المستقيمة تصل بين الأماكن المشاهدة للجسيم في فترات زمنية متساوية

في عام 1905 فحص ألبرت آينشتاين الحركة البراونية من الوجهة النظرية وكان قادرًا بواسطة البيانات التجريبية على حساب الحجوم والكتل التقريبية للذرات والجزيئات. وقد أظهرت حساباته أنّ قطر الذرة النموذجية يبلغ حوالي 10^{-10} m.

حالات المادة

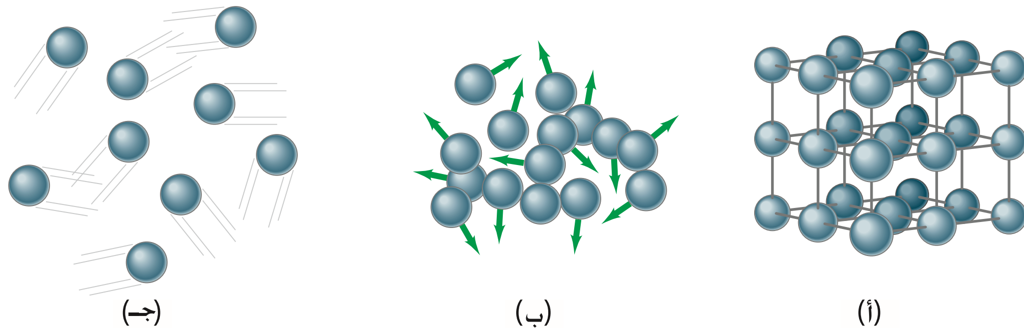
الخصائص الجاهرية و المجهرية.

في بداية (الفصل 10)، ميّزنا حالات المادة الثلاث أو أطوار المادة: الصلب، والسائل، والغاز، اعتمادًا على خصائص **عينية** "تدريج كبير". وسنرى الآن كيفية اختلاف هذه الأطوار الثلاثة للمادة من وجهة النظر الذرية أو **المجهرية**. من الواضح أنّ الذرّات والجزيئات تؤثّر بقوى جاذبةٍ في بعضها، وإلا فكيف ستتماسك قطعة من الحجر أو الألمنيوم معًا؟ هناك طبيعةٌ كهربائيّةٌ لقوى الجذب هذه بين الجزيئات (سيذكر الكثير من ذلك في فصول لاحقة). وعندما تقترب الجزيئات من بعضها، يجب أن تصبح القوى بينها قوى تنافر (تنافر كهربائي بين إلكتروناتها الخارجية)، وإلا فكيف ستشغل المادة حيّزًا؟ وهكذا تحافظ الجزيئات على إبقاء مسافة دنيا بينها.

في المادة الصلبة تكون قوى التجاذب كبيرة لدرجة أنّ حركة الذرات والجزيئات تكون ضئيلة (اهتزازية) حول مواقع سكونها، في نظام يعرف عادة بالشبكة البلّورية، كما هو مبيّن في (الشّكل 13 – 2أ). أمّا في السوائل فتكون حركة الذرات والجزيئات أسرع، أو أنّ القوى بينها تكون أضعف، لدرجة أنّها تنتقل بحريّةٍ أكثر، كما في (الشّكل 13 – 2ب). في حين تكون القوى في الغازات ضعيفة جدّا، أو أنّ السرعات تكون عالية، لدرجة أنّ الجزيئات لا تبقى قريبةً من بعضها، بل إنّها تتحرّك بسرعةٍ في الاتجاهات كلّها ، (الشكل 13 – 2جـ)، لتملأ أيّ وعاء، وأحيانًا تصطدم ببعضها.

* أحيانًا تستعمل تعبيرات الوزن الذري والوزن الجزيئي لهذه الكميات، لكننا في الواقع نقارن الكتل.

** العنصر هو مادة مثل الذهب، والحديد، والنحاس، التي لا يمكن تجزئتها لمواد أبسط بالوسائل الكيماوية. أمّا المركبات فهي مواد مكوّنة من عناصر ويمكن تحليلها إلى ذرّات كثاني أكسيد الكربون والماء. إنّ أصغر جزءٍ من العنصر هي الذرة، في حين أنّ الجزيء هو أصغر جزء من المركب. وتتكوّن الجزيئات من ذرات: فجزيء الماء مثلاً مكوّن من ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين، وصيغته الكيماوية هي H_2O.



الشكل 13 - 2 ترتيب الذرات في (أ) صلب بلوري. (ب) سائل. (جـ) غاز.

في المتوسط، تكون السرعة عالية في الغازات بحيث عندما يتصادم جزيئان، فإنّ قوّة التجاذب ليست قويّةً بما يكفي لحفظهما قريبين، وينتقلان في اتجاهين جديدين.

المثال 13-1 خمّن البعد بين الذرات

تساوي كثافة النحاس $8.9 \times 10^3\ kg/m^3$، وكلّ ذرة نحاس كتلتها $63\ u$. احسب بالتقريب المسافة المتوسطة بين ذرات النحاس المتجاورة.

النّهج: نفترض مكعبًا من النحاس طول ضلعه $1\ m$. ومن الكثافة، يمكننا حساب كتلة مكعب حجمه $1\text{-}m^3$. نقسم ذلك على كتلة ذرة واحدة $(63\ u)$ لإيجاد عدد الذرات في $1\ m^3$.
ليكن N عدد الذرات في طول $1\ m^3$. وهكذا، فإنّ $(N)(N)(N) = N^3$ هو عدد الذرات في $1\ m^3$.

الحلّ: كتلة ذرة نحاس واحدة هي $63\ u = 63 \times 1.66 \times 10^{-27}\ kg = 1.05 \times 10^{-25}\ kg$.
وهذا يعني أنه في مكعب طول ضلعه $1\ m$ (الحجم $= 1\ m^3$) هناك

$$\frac{8.9 \times 10^3\ kg/m^3}{1.05 \times 10^{-25}\ kg/atom} = 8.5 \times 10^{28}\ atoms/m^3$$

ولذلك على أحد جوانب مكعب حجمه $V = l^3$ هناك عدد من الذرات

$$(8.5 \times 10^{28})^{\frac{1}{3}}\ atoms = 4.4 \times 10^9.$$

لذا، تكون المسافة بين الذرات المتجاورة

$$\frac{1\ m}{4.4 \times 10^9\ atoms} = 2.3 \times 10^{-10}\ m$$

ملحوظة: انتبه للوحدات. مع أنّ "الذرات" ليست وحدات، إلاّ أنه من المفيد تضمينها للتأكد أنك تحسب بصورة صحيحة.

13-2 درجة الحرارة وموازين الحرارة

في الحياة اليومية، تُعدّ **درجة الحرارة** مقياسًا لمدى سخونة الجسم أو برودته. ومن هنا يقال إنّ الفرن الساخن درجة حرارته عالية، أمّا درجة حرارة الجليد فمنخفضة.

إنّ كثيرًا من خصائص المادة تتغير مع درجة الحرارة. فمثلًا، هناك العديد من المواد تتمدد عند تسخينها.* فعمود من الحديد سيزداد طوله عندما يكون ساخنًا، ولكنه يتقلص قليلًا تبعًا لانخفاض درجة الحرارة هذه، والتي بسببها توضع فواصل قابلة للانضغاط أو وصلات للتمدد (الشكل 13 - 3) على مسافات منتظمة. كما أنّ المقاومة الكهربائية للمادة تتغير كذلك بتغير درجة الحرارة (انظر الفصل 18) واللون الذي يشع من الأجسام على الأقل عند درجة الحرارة العالية. ومن الممكن أنك قد لاحظت أن سلك التسخين في المدفأة الكهربائية يتوهج بلون أحمر عندما يسخن. وعند درجات الحرارة الأعلى، تتوهج المواد الصلبة كالحديد بلون أصفر وحتى الأبيض. إنّ الضوء الأبيض الناتج من مصباح الإنارة المتوهج ينتج من سلك تنجستن حار جدًا. ويمكن قياس درجة حرارة سطح الشمس والنجوم الأخرى بواسطة اللون (وبدقة أكبر الأطوال الموجية) للضوء الذي تشعّه.



الشكل 13 – 3 وصلة تمدّد على جسر

تسمى الأدوات المصممة لقياس درجات الحرارة **موازين حرارة**.

هناك أنواع كثيرة من الموازين، إلا أنّ عملها يعتمد دائمًا على خاصية في المادة تتغير مع درجة الحرارة. تستند معظم موازين الحرارة الدارجة إلى تمدد المادة بزيادة درجة الحرارة. إنّ أول فكرة لميزان الحرارة (الشكل 13 – 4أ)، تعود إلى غاليلو، عن طريق استخدامه تمدد الغاز. تتألف موازين الحرارة الدارجة اليوم من أنبوب زجاجي أجوف مملوء بالزئبق أو بالكحول الملون بصبغة حمراء، كأول موازين حرارة مستعملة (الشكل 13 – 4 ب) (الشكل 13 – 4جـ) يبينان ميزان حرارة طبي من نوع آخر يعتمد على تغير الكثافة مع درجة الحرارة.

* معظم المواد تتمدد بزيادة درجة الحرارة، ولكن ليس كلّها. فالماء، مثلاً، يتقلص مع زيادة درجة الحرارة في مدى الحرارة $0°C$ إلى $4°C$ (انظر البند 13 - 4).



(أ)



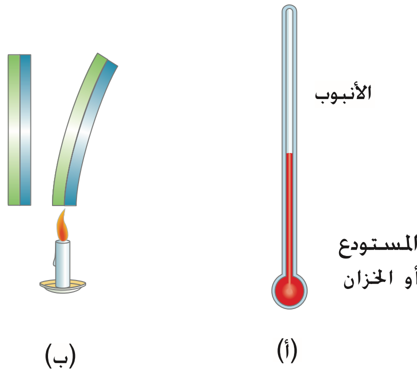
(ب)



(جـ)

(الشكل 13 - 4) (أ) نموذجٌ لفكرة غاليلو الأصلية لميزان الحرارة. (ب) موازين حرارةٍ حقيقيّةٍ بواسطة الأكاديميّة ديلا سيمنتو (1667-1657) بنيت في فلورنسا وكانت من بين المعروفة مبكرًا. تحتوي هذه الأدوات الحساسة على الكحول، وأحيانًا كان ملونًا مثل كثيرٍ من موازين الحرارة في أيامنا هذه. (جـ) وكانت موازين الحرارة الطبية لها شكل الضفدع بواسطة الأكاديمية ديلا سيمنتو يمكن ربطها على معصم المريض. لكلّ من الكرات الصغيرة المعلقة في السائل كثافة مختلفة قليلًا. عدد الكرات التي يمكن أن تغطس كانت مقياسًا لحمّى المريض.

في ميزان الحرارة الذي يحتوي سائلًا في زجاج، يتمدّد السائل أكثر من تمدّد الزجاج عند رفع درجة الحرارة. لذلك، يرتفع مستوى السائل في الأنبوب (الشكل 13 – 5أ). وعلى الرغم من أنّ الفلزات تتمدد بالحرارة أيضًا، إلا أنّ الزيادة في طول قضيب فلزي عادة تكون صغيرة ويصعب قياسها بدقة للتغيرات العادية في درجة الحرارة. وعلى أيّ حال، يمكن عمل ميزان حرارة مفيد بربط فلزين مختلفين معًا بحيث يكون معدل تمددهما مختلف (الشكل 13 – 5ب). عند زيادة درجة الحرارة، يختلف مقدار التمدد بسبب انحناء الشريحة الفلزية المزدوجة. وتكون الشريحة المزدوجة عادة بصورة ملف، إحدى نهايتيها ثابتة، أما الأخرى فترتبط بمؤشر، (الشّكل 13 - 6). ويُستعمل هذا النوع من موازين الحرارة كميزان حرارة الهواء، وميزان حرارة الأفران، ومفاتيح أجهزة إعداد القهوة، ومنظم الحرارة في الغرفة للتحكم بفتح السخانات وإغلاقها، ومكيفات الهواء. تستعمل موازين الحرارة الدقيقة الخصائص الكهربائية (الفصل 18)، مثل موازين المقاومة، والازدواجات الحرارية وعادة مع قراءة رقمية.



الشكل 13 - 5 (أ) ميزان حرارة زئبقي أو كحولي في الزجاج. (ب) شريحة معدنية مزدوجة.

الشكل 13 – 6 صورة لميزان حرارة يستخدم شريحة معدنية مزدوجة ملفوفة.



جناحا الطائرة والرفع الديناميكي

لقياس درجة الحرارة بصورة كمية؛ لا بدّ من تعريف نوع من التدريج العددي. إنّ أكثر التدريجات شيوعًا هو تدريج سيلزيوس، ويدعى أحيانًا تدريج **سنتغراد**. أما في **الولايات المتحدة**، فإنّ تدريج **فهرنهايت** أيضًا شائع. ولكن أكثر التدريجات أهمية من الناحية العلمية هو التدريج المطلق، أو **كلڤن**، وسوف يتم مناقشته لاحقًا في هذا الفصل.

إنّ إحدى الطرائق لتعريف تدريج حراري هو تعيين قيم اختيارية لدرجتي حرارة يمكن إعادة قياسهما. وللتدريجين السيلزيوسي والفهرنهايتي، تم اختيار درجتي حرارة لتكونا نقطتي التجمد والغليان* للماء، وتُؤخذان عند الضغط الجوي. فدرجة التجمد في التدريج السيلزيوسي هي الصفر 0°C ودرجة الغليان 100°C.

* درجة تجمد مادة ما هي درجة الحرارة التي يكون عندها طورا الحالة الصلبة والسائل في حالة اتزان؛ أي دون تحول السائل كاملا إلى صلب أو العكس. تجريبيًا، وجد أن ذلك يحدث عند درجة حرارة محددة تحت ضغط معين. وكذلك درجة الغليان عرفت بدرجة الحرارة التي عندها يكون السائل والغاز في حالة اتزان، ولأنّ هاتين النقطتين تتغيران مع الضغط، لذا يجب تحديده (عادة 1 atm).

على التدريج الفهرنهايتي، عُرّفت درجة التجمّد عند 32°F، ودرجة الغليان عند 212°F. يُدَرَّجُ ميزان الحرارة بوضعه في ظروف هُيّئت بدقةٍ عند كلّ من درجتي الحرارة، ووُضع علامة عند موضع السائل أو المؤشر: في ميزان سيلزيوس، المسافة بين العلامتين تُقسم إلى مئة فترة متساوية تمثل كلّ درجة بين 0°C و 100°C (سنتغراد تعني مئة خطوة). أما في تدريج فهرنهايت، فإنّ المسافة بين 32°F و 212°F تقسم إلى 180 فترة. ولدرجات الحرارة تحت نقطة التجمد وفوق درجة غليان الماء يمكن عمل امتداد للتدريج باستعمال طول الفترة نفسه.

وعلى أيّ حال، فإنّ موازين الحرارة تستخدم عبر مدى محدد نظرًا لمواصفات هذه الموازين الخاصة. فمثلا، يتجمد سائل الزئبق في الميزان الزئبقي عند نقطة معينة، ودون هذه الدرجة يصبح الميزان عديم الفائدة.

كما أنّ ذلك ينطبق فوق درجات حرارة معينة والتي عندها يتبخر السائل. ولدرجات الحرارة المنخفضة كثيرًا أو المرتفعة أيضًا، تستعمل موازين خاصة سنذكر بعضا منها لاحقًا.

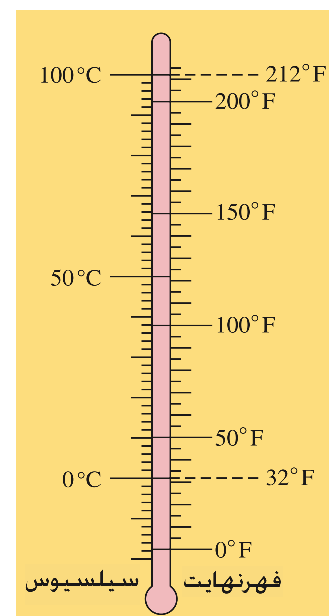
إنّ كلّ درجة حرارة على ميزان سيلزيوس تقابل درجة على ميزان فهرنهايت، (الشكل 13 - 7). يمكن التحول بسهولة من تدريج إلى آخر إذا تذكرت أنّ 0°C مقابل 32°F، وأنّ مدى 100°C على ميزان سيلزيوس تقابل 180° على تدريج فهرنهايت. وهكذا، فإنّ درجة فهرنهايت واحدة (1 F°) تقابل $\frac{5}{9} = 100/180$ على مقياس سيلزيوس (1 C°).

ملاحظة: عندما تشير إلى درجة حرارة معينة. نقول" درجة مئوية" كما في $20°C$؛ ولكن عندما تشير إلى تغير في الحرارة أو في فترة حرارية. كما في "$2\ C°$" ويمكن كتابة التحويل بين مقياسي الحراة على الصورة .

أي أنّ $1\ F° = \frac{5}{9}\ C°$. ويمكن كتابة التحويل بين التدريجين كما يلي:

$$T(°F) = \tfrac{9}{5}T(°C) + 32 \quad \text{أو} \quad T(°C) = \tfrac{5}{9}[T(°F) - 32]$$

وبدل من حفظ هاتين العلاقتين (حيث يسهل الخلط بينهما)، عادة نتذكر أنّ $0°C = 32°F$ وأنّ تغيُّر 5 C° يساوي تغيرًا مقداره 9 F°.



الشكل 13-7 مقارنة بين التدريجين؛ السيلزيوسي والفهرنهايتي.

تنويه:
حوّل درجة الحرارة بتذكر أنّ
$0°C = 32°F$
وأنّ تغير $5\ C° = 9\ F°$.

المثال 13-2 **كيف تقيس درجة حرارتك؟**

درجة حرارة الجسم الطبيعي هي 98.6°F. ماذا تعادل هذه الدرجة على تدريج سيلزيوس؟

النّهج: تذكر أنّ $0°C = 32°F$، وأنّ $5\ C° = 9\ F°$

الحلّ: أولا، نقرن درجة الحرارة المعطاة بدرجة تجمد الماء (0°C). أي أنّ 98.6°F هي $98.6 - 32.0 = 66.6\ F°$ فوق درجة تجمد الماء. ولأنّ كلّ درجة F° تساوي $\frac{5}{9}C°$، فهذا يكافئ درجة $66.6 \times \frac{5}{9} = 37.0$ سيلزيوس فوق درجة التجمد. درجة التجمد هي 0°C. لذلك، فدرجة الجسم تساوي 37.0°C.

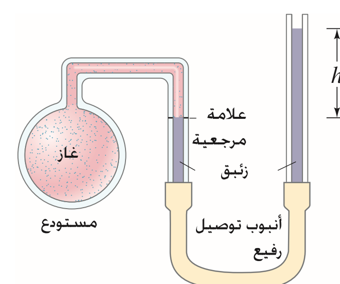
التمرين أ : عين درجة الحرارة التي عندها يتفق التدريجان $(T_C = T_F)$.

إنّ المواد المختلفة لا تتمدد بالكيفية نفسها فوق مدى واسع من درجات الحرارة. وبالتالي، إذا درّجنا أنواعًا مختلفة من الموازين بالضبط كما وصفنا سابقًا، فإنّها عادةً لاتتفق بدقة. وبسبب كيفية تدريجهما، سوف تتفق 0°C و 100°C. ولكن، نظرًا لاختلاف خصائص تمددها، فقد لا تتفق في المنطقة البينية (تذكر أننا قسمنا التدريج بين 0°C، و 100°C إلى 100 فترة متساوية). وهكذا، فقد يسجل ميزان حرارة زئبق مدرج بحرص 52.0°C، ولكن ميزانا من نوع آخر مدرجا كذلك بدقة قد يسجل 52.6°C.

وبسبب هذا التفاوت، لابدَّ من اختيار نوع عياري بحيث تُعرف هذه الدرجات المتوسطة بدقة. إنّ النوع العياريّ لهذا الغرض هو ميزان الغاز ثابت الحجم.

وكما هو مبين في الرسم المبسط في (الشكل 13 - 8)، يتكوّن هذا الميزان من مستودع مملوء بغاز مخفف موصول بأنبوب رفيع إلى مانومتر زئبقي.

الشكل 13-8 مقياس حرارة الغاز الثابت الحجم.



وبرفع الأنبوب الأيمن من المانوميتر أو خفضه، يمكن الإبقاء على حجم الغاز ثابتًا بحيث ينطبق الزئبق في الأنبوب الأيسر مع علامة المرجع. إنّ زيادة درجة الحرارة تسبب زيادة متناسبة في الضغط داخل المستودع. ولذلك يجب رفع الأنبوب إلى الأعلى للحفاظ على حجم الغاز ثابتًا. وعليه، فإنّ ارتفاع الزئبق في الأنبوب الأيمن هو مقياس لدرجة الحرارة. إنّ ميزان الحرارة هذا يعطي النتائج نفسها للغازات جميعها في النهاية الحدّيّة لتخفيض ضغط الغاز في المستودع إلى الصفر. ويعمل التدريج الناتج كقاعدة لميزان الحرارة العياري.

3-13 الاتزان الحراري وقانون الديناميكا الحرارية الصفري. *

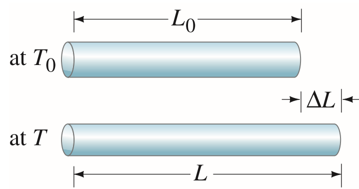
كلُّنا معتادون على الحقيقة بأنّه إذا وضع جسمان درجتا حرارتيهما مختلفتين في حالة تماس حراري (يعني أنّ الطاقة الحرارية يمكن أن تنتقل من أحدهما إلى الآخر)، فسوف يصل الجسمان في النهاية إلى درجة الحرارة نفسها. يقال عندها إنّهما في حالة اتزان حراري. مثلا، تضع ميزان الحرارة الطبي في فمك حتى تصل إلى اتزان حراري مع محيطه، ومن ثم تقرأه. ويقال إن جسمين في حالة اتزان حراري إذا وُضعا في حالة تماس حراري، ولم تنتقل طاقة حرارية من أحدهما إلى الآخر، ولا تتغير درجة حرارتيهما. تشير التجارب إلى أنه إذا كانا في حالة اتزان حراري مع نظام ثالث فإنهما سيكوّنان نظامين في حالة اتزان حراري مع بعضهما. هذه المُسَلَّمة تدعى قانون الديناميكا الحرارية الصفري. وقد سميت بهذا الاسم غير المعتاد لأنه بعد الانتهاء من وضع قانوني الديناميكا الحرارية الأول والثاني (الفصل 15) أدرك العلماء أنّ هذه المسلمة الواضحة يجب صياغتها أولا.

درجة الحرارة هي خاصِّيَّة النظام التي تقرّر فيما إذا كان النظام في حالة اتزان حراري مع أنظمة أخرى. عندما يكون نظامان في حالة اتزان حراري، فإن درجتي حرارتيهما ستكونان متساويتين بالضرورة، وسوف لا يتم أيّ تبادل حراري بينهما. وهذا ينسجم مع انطباعنا اليومي لدرجة الحرارة، لأنه عند وضع جسم ساخن في حالة تماس مع جسم بارد، فسوف يصلان أخيرا إلى درجة الحرارة نفسها. لهذا، فإنّ أهمية القانون الصفري في أنه يسمح بتعريف مفيد لدرجة الحرارة.

4-13 التّمدّد الحراريّ

تتمدّد معظم المواد إذا سُخِّنَتْ، وتتقلّص إذا بردت. وعلى أيّ حال، فإنّ مقدار التمدّد والتقلص يختلف، وذلك استنادا إلى نوع المادة.

التمدد الطولي



الشكل 13 – 9 قضيب رقيق طوله L_0 عند درجة حرارة T_0 يسخن إلى درجة حرارة T ليصبح طوله L، حيث $L = L_0 + \Delta L$

تشير التجارب إلى أنّ التغيّر في الطول ΔL في معظم المواد الصلبة، وبتقريب جيد، يتناسب طرديًا مع التغيّر في درجة الحرارة ΔT، ما دام ΔT ليس كبيرًا جدًا. كما هو متوقع فإنّ التغيّر في الطول يتناسب أيضًا مع الطول الأصلي للجسم L_0، (الشكل 13 – 9). أي أنّه وللتغيّر نفسه في درجة الحرارة، فإنّ قضيبًا من الحديد طوله 4-m سوف يزداد في الطول ضعف زيادة قضيب آخر من الحديد طوله 2-m. ويمكننا كتابة هذا التناسب بصورة معادلة كالآتي:

التمدد الطولي.

$$\Delta L = \alpha L_0 \, \Delta T \qquad \textbf{(13 – 1أ)}$$

حيث α ثابت التناسب، ويُسَمّى معامل التّمدّد الطّوليّ لمادة معيّنة وله وحدات $(C°)^{-1}$. نعوض $L = L_0 + \Delta L$، ونكتب المعادلة السابقة على الصورة الآتية:

$$L = L_0(1 + \alpha \, \Delta T) \qquad \textbf{(13 – 1ب)}$$

حيث L_0 هو الطول الابتدائي عند درجة حرارة T_0، و L هو الطول بعد التسخين أو التبريد إلى درجة T. إذا كان التغير في درجة الحرارة $\Delta T = T - T_0$ سالبًا، فإنّ $\Delta L = L - L_0$ سيكون سالبًا أيضًا. وبالتالي، يقلّ الطول مع انخفاض درجة الحرارة.

الجدول 13 - 1 معاملات التمدد، قرب 20°C.

المادة	معامل التمدد الطولي $\alpha(C°)^{-1}$	معامل التمدد الحجمي $\beta(C°)^{-1}$
مواد صلبة		
ألمنيوم	25×10^{-6}	75×10^{-6}
نحاس أصفر	19×10^{-6}	56×10^{-6}
نحاس أحمر	17×10^{-6}	50×10^{-6}
ذهب	14×10^{-6}	42×10^{-6}
حديد أو فولاذ	12×10^{-6}	35×10^{-6}
رصاص	29×10^{-6}	87×10^{-6}
زجاج (بايركس)	3×10^{-6}	9×10^{-6}
زجاج (عادي)	9×10^{-6}	27×10^{-6}
كوارتز	0.4×10^{-6}	1×10^{-6}
أسمنت	$\approx 12 \times 10^{-6}$	$\approx 36 \times 10^{-6}$
رخام	$1.4\text{-}3.5 \times 10^{-6}$	$4\text{-}10 \times 10^{-6}$
سوائل		
كاز		950×10^{-6}
زئبق		180×10^{-6}
كحول إيثايل		1100×10^{-6}
غلسرين		500×10^{-6}
ماء		210×10^{-6}
غازات		
هواء (ومعظم الغازات عند الضغط الجوي)		3400×10^{-6}

قيم α للمواد المختلفة عند 20°C المعروضة في (الجدول 13-1) في الواقع, تختلف α قليلاً مع درجة الحرارة (وذلك تختلف دقة مقاييس درجات الحرارة المصنعة من مواد مختلفة) ولكن، إذا لم يكن مدى درجات الحرارة كبيراً فيمكن إهمال هذا التفاوت عادة.

تطبيق الفيزياء
التمدد في المباني (الإنشاءات)

المثال 13-3 تمدّد الجسور

الفرشة الفولاذية لجسر معلّق طولها 200 m عند درجة 20°C. إذا كان حدّا الحرارة اللذان قد يتعرض لهما الجسر هما -30°C و +40°C، فما مقدار تقلصها وتمددها؟

النّهج: سوف نفرض أنّ الفرشة الفولاذية تتمدد وتتقلص بصورة خطية مع درجة الحرارة، كما هو معطى في (المعادلة 13 – 1أ).

الحلّ: من (الجدول 13 - 1)، نجد أنّ $\alpha = 12 \times 10^{-6}(C°)^{-1}$ للفولاذ.

الزيادة في الطول عندما يكون عند درجة 40°C:

$$\Delta L = \alpha L_0\,\Delta T = (12 \times 10^{-6}/C°)(200\,\text{m})(40°C - 20°C) = 4.8 \times 10^{-2}\,\text{m}$$

أو 4.8 cm. وعندما تكون درجة الحرارة $-30°C, \Delta T = -50\ C°$ عندها

$$\Delta L = (12 \times 10^{-6}/C°)(200\,\text{m})(-50\,C°) = -12.0 \times 10^{-2}\,\text{m}$$

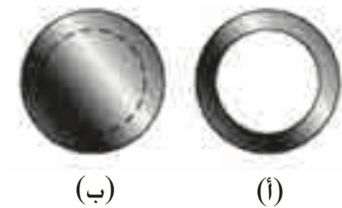
أو نقص في الطول مقداره 12 cm. المدى الكلّي الذي يجب أن تتلاءم معه وصلات التمدد هو $12\ \text{cm} + 4.8\ \text{cm} \approx 17\ \text{cm}$

المثال المفاهيمي 13-4 هل تتمدد الفجوات أم تتقلص؟

إذا سُخّنت حلقةٌ دائريّة رقيقة (الشكل 13 – 10أ) في فرن، فهل ستكبر هذه الحلقة أم ستصغر؟

الإجابة: قد تظن بأنّ الفلز يتمدد إلى داخل الفجوة ممّا يؤدّي إلى صغر الفتحة، إلا أنّ الأمر ليس كذلك. تخيل أنّ الحلقة مصمتة مثل قطعة النقود (الشكل 13-10ب). ارسم دائرةً عليها بقلم كمّا هو مبين. عند تمدّد الفلز، فإنّ المادة في داخل الدائرة تتمدد مع بقية الفلز. ولذلك، تكبر الدائرة. اقطع الفلز حيث تكون الدائرة، فسترى أنّ الفجوة تكبر من حيث القطر.

الشكل 13 - 10 (المثال 13 - 4)



المثال 13-5 حلقة على قضيب

يُراد مواءمة حلقةٍ بإحكام على قضيبٍ أسطواني. عند 20°C، قطر القضيب 6.445 cm، والقطر الداخلي للحلقة 6.420 cm. ولكي تنزلق الحلقة حول القضيب، يجب أن تكون أكبر قليلًا من قطره بحوالي 0.008 cm. إلى أيّ درجة حرارة يجب تسخين الحلقة بحيث يكون قطرها كبيرًا بما يكفي لتنزلق حول القضيب؟

النهج: الفجوة في الحلقة يجب زيادتها من قطر 6.420 cm إلى قطر 6.445 cm + 0.008 cm = 6.453 cm. ويجب تسخين الحلقة؛ لأنّ قطرها يزداد خطيًّا مع درجة الحرارة. (كما في المثال 13 - 4).

الحل: نحلّ (المعادلة 13 – 1أ) لإيجاد ΔT

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha L_0} = \frac{6.453\ \text{cm} - 6.420\ \text{cm}}{(12 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ)(6.420\ \text{cm})} = 430\ \text{C}^\circ$$

لذلك، يجب زيادة درجة الحرارة إلى $T = (20°C + 430°C) = 450°C$ على الأقل.

ملحوظة: في حلّ المسائل؛ تذكّر الخطوة الأخيرة، وهي إضافة درجة الحرارة الابتدائية هناك (20°C).

تطبيق الفيزياء
فتح غطاء محكم الإغلاق.

المثال المفاهيمي 13-6 فتح غطاء جرة مغلقة بإحكام

لديك جرّةٌ زجاجيّةٌ مغلقةٌ بإحكام، إذا وُضع غطاؤها في مجرى ماءٍ ساخنٍ لفترةٍ وجيزة، فسيصبح فتحها أسهل. لماذا؟

الإجابة: يمكن أن يصطدم الماء الساخن بالغطاء مباشرةً أكثر من الزجاج، ولذلك يتمدّد مبكّرًا. ولكن حتى لو لم يكن الأمر كذلك، فإنّ الفلزات تتمدّد أكثر من الزجاج للتغيّر نفسه في درجة الحرارة، (α أكبر – انظر الجدول 13 - 1).

التمدد الحجمي

إنّ التغيّر في حجم المادة يخضع لتغيّرٍ في درجة الحرارة، يُعطى بعلاقة مشابهة للمعادلة (13 – 1أ)، أي

التمدد الحجمي.

$$\Delta V = \beta V_0\, \Delta T \qquad \textbf{(2-13)}$$

حيث ΔT هو التغيّر في درجة الحرارة، أما V_0 فهو الحجم الأصلي، في حين يشير ΔV إلى التغير في الحجم، وβ هو معامل التمدد الحجمي. إنّ وحدات β هي $(°C)^{-1}$ وقيم β لمواد مختلفة معروضة في (الجدول 13-1).

$\beta \approx 3\alpha$

لاحظ أنّ β للمواد الصلبة تساوي تقريبًا 3α (حلّ سؤال 19 لمعرفة السبب). وللمواد الصلبة غير المتجانسة (أي ليس لها الخصائص نفسها في الاتجاهات جميعها)، فإنّ العلاقة $\beta \approx 3\alpha$ لا تنطبق. (لاحظ أنّ التمدد الطولي ليس له معنى في السوائل والغازات لأنّ ليس لها أشكال ثابتة).

تطبيق الفيزياء
فيضان خزان الوقود.

المثال 13-7 خزان وقود تحت تأثير الشمس

خزّان وقود سيارة، سعته 70 -L، تمّت تعبئته كاملًا عند 20°C. وقفت السيارة تحت أشعة الشمس بحيث وصلت درجة حرارة الخزان إلى 40°C (104°F). فكم كمية الوقود التي ستتدفق خارج الخزان؟

النهج: سيتمدّد كلّ من الوقود والخزان بسبب التغيّر في درجة الحرارة، وسوف نفرض أنّ ذلك يتمّ بصورة خطيّة كما في (المعادلة 13 - 2). حجم الوقود المتدفق خارج الخزان يساوي الزيادة في حجم الوقود مطروحًا منها الزيادة في حجم الخزان.

الحلّ: الوقود يتمدد بـ

$$\Delta V = \beta V_0\, \Delta T = (950 \times 10^{-6}\ \text{C}^{\circ -1})(70\ \text{L})(40°\text{C} - 20°\text{C}) = 1.3\ \text{L}$$

الخزّان يتمدّد كذلك. يمكن أن نعتبر الخزان قشرةً فولاذيّةً تتمدّد حجميًّا $(\beta \approx 3\alpha = 36 \times 10^{-6}\ \text{C}^{\circ -1})$. لو كان الخزان مصمتًا، فإنّ القشرة سوف تتمدد بالطريقة نفسها. لذلك سيزداد حجم الخزان بـ

$$\Delta V = (36 \times 10^{-6}\ \text{C}^{\circ -1})(70\ \text{L})(40°\text{C} - 20°\text{C}) = 0.050\ \text{L}$$

لذلك، فإنّ تمدّد الخزّان ذو أثر قليل. ومن هنا، فإنّ أكثر من لترٍ من الوقود سوف ينسكب خارجًا.

ملحوظة: هل تريد توفير بعض النقود؟ املأ الخزان عندما يكون باردًا والوقود أكثف؛ جزيئات أكثر مقابل نقود أقلّ. ولكن لا تملأ الخزان إلى حافته.

(المعادلتان 13 - 1 و 13 - 2) دقيقتان فقط إذا كان ΔL (أو ΔV) صغيرًا بالمقارنة مع L_0 (أو V_0) إنّ هذا مهمٌّ بصورة خاصة في السوائل وهو أكثر أهمية في الغازات نظرًا لكبر قيم β. إضافة إلى ذلك، تتغيّر β نفسها بصورةٍ جوهريّةٍ مع درجة الحرارة في الغازات. لهذا، فإنّ وصفًا أفضل للتغيّر الحجميّ للغازات أمرٌ ضروري، كما سنناقش في (البند 13 - 6).

التّصرّف الشّاذ (غير العادي) للماء دون درجة 4°C

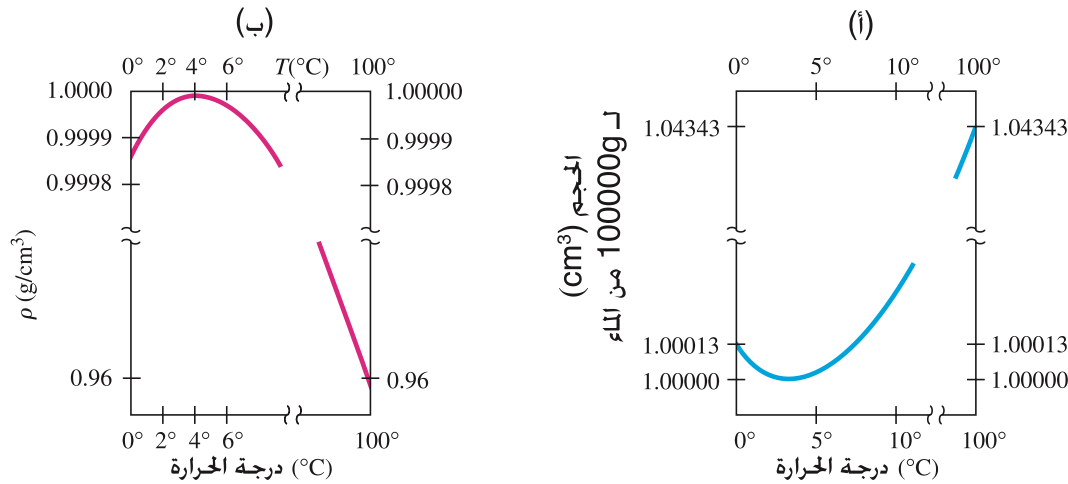
الماء غير عادي: يتقلص عند تسخينه من 0°C إلى 4°C.

تتمدّد معظم المواد بانتظام تقريبًا مع زيادة درجة الحرارة ما دام ليس هناك تغيّرٌ في الطور (الحالة). لكن الماء، لا يتبع النمط العادي. فإذا سخنا الماء الذي درجته 0°C، فسينقص حجمه حتى يصل إلى درجة حرارة 4°C، ثم يتصرف الماء بالصورة المعتادة، ويتمدد حجمه كلّما زادت درجة الحرارة، (الشكل 13 - 11). لذلك، فالماء له أكبر كثافة عند 4°C. هذا التصرف الشاذ للماء ذو فائدة عظيمة للإبقاء على الأحياء المائية حيّة خلال فصول الشتاء الباردة. عندما تكون درجة حرارة الماء في بحيرة أو نهر أعلى من 4°C، ويبدأ بالبرودة نتيجة ملامسته للماء البارد، فإنّ ماء السطح يغطس لأنّ كثافته أكبر. يحلّ محلّه ماءٌ أكثر دفئًا من أسفل. هذا المزج يستمر حتى يصل إلى 4°C. عندما يبرد سطح الماء أكثر، يبقى على السطح لأنه أقل كثافة من الماء الذي درجة حرارته 4°C. لذلك، يتجمد الماء على السطح أولا، ويبقى الجليد على السطح لأنه (الوزن النوعي= 0.917) أقل كثافة من الماء. يبقى الماء في القعر سائلا، إلا إذا كان الطقس باردًا جدًّا بحيث يتجمد الماء كله. لو كان الماء كباقي المواد، فإنّه يصبح أكثر كثافةً كلّما برد، وسوف يتجمد الماء في قعر البحيرة أولا. وسوف تتجمد البحيرات بسرعة أكبر لأنّ دورة الماء تجلب الماء الدافئ إلى السطح ليتمّ تبريده. التجمّد الكامل للبحيرة سوف يُلحق تلفًا كبيرًا للحياة النباتية والحيوانية. وبسبب التصرف غير العادي للماء دون درجة 4°C، فنادرًا ما يتجمّد الكم الكبير منه، وهذا يتمّ بمساعدة الطبقة السطحية الجليدية التي تتصرف بدورها كعازل لإبقاء تدفق الحرارة خارج الماء إلى الهواء البارد فوقها. ودون هذه الخاصية الشاذة للماء، على الرغم من أهمّيّتها الفائقة، فإنّ الحياة على هذا الكوكب كما نعرفها قد لا تكون ممكنة.

تطبيق الفيزياء
الحياة تحت الجليد.

لا يتمدّد الماء فقط عند تبريده من 4°C إلى 0°C، لكنّه يتمدّد أكثر عند تحوّله إلى جليد. لهذا، فإنّ مكعبات الجليد تطفو على سطح الماء، وتتكسر الأنابيب عندما يتجمد الماء داخلها.

الشكل 13 - 11 تصرف الماء كدالة بدرجة الحرارة قرب 4°C . (أ) حجم 1.00000 gram من الماء كدالة في درجة الحرارة. (ب) الكثافة مقابل درجة الحرارة. [لاحظ الانقطاع في كل محور].



* 13-5 الشّدّ (التّوتّر) الحراريّ

في كثيرٍ من الحالات، كما في المباني والطرق، فإنّ نهايات الدعامات، أو شرائح من المواد، تكون مثبتةً بقوّةٍ ممّا يحد من تمدّدها أو تقلّصها. وإذا تغيّرت درجة الحرارة، فإنّ شدًّا كبيرًا أو ضغطًا يُدعى الشدّ الحراري، سيحدث. ويمكن حساب مقدار هذا الشدّ باستعمال مفهوم معامل المرونة الذي ذكر في الفصل التاسع. ولحساب الشّدّ الداخلي، يمكننا أن نفكّر في أنّ العملية حصلت على مرحلتين: تحاول الدعامة أن تتمدد (أو تتقلص) بمقدار ΔL المبنية في (المعادلة 13 - 1)؛ وكذلك المادة الصلبة الملاصقة للدعامة تؤثر فيها بقوّة لتضغطها (أو تمددها)، محافظة عليها عند الطول الأصليّ نفسه. القوّة المطلوبة تُعطى وفق (المعادلة 9 - 4):

$$\Delta L = \frac{1}{E}\frac{F}{A}L_0$$

حيث E معامل يانغ لهذه المادة. ولحساب الشد الداخلي F/A، ندع ΔL في (المعادلة 13 – 1أ) تساوي ΔL في المعادلة أعلاه لنجد

$$\alpha L_0\,\Delta T = \frac{1}{E}\frac{F}{A}L_0$$

ومن ثمّ فإنّ الشّدّ يساوي

$$\frac{F}{A} = \alpha E\,\Delta T$$

المثال 13-8 الشد في الأسمنت في يوم حار

تطبيق الفيزياء
التواء الطريق السريع

يُراد بناء طريق سريع من قطع من الأسمنت بطول 10 m توضع متلاصقة دون فواصل للسماح بالتمدد. إذا وضعت هذه القطع عند درجة حرارة 10°C، فما الشد الانضغاطي الذي سيحدث إذا وصلت درجة الحرارة إلى40°C؟ مساحة التماس لكلّ قطعة $0.20\ m^2$. هل سيحدث تشوه؟

النهج: نستعمل تعبير الشد F/A الذي سبق اشتقاقه، ونجد قيمة E من (الجدول 9 - 1). لمعرفة فيما إذا حدث تشوه أم لا، نقارن هذا الشد مع قدرة تحمل الأسمنت، (الجدول 9 – 2).

الحلّ:

$$\frac{F}{A} = \alpha\,E\,\Delta T = (12\times10^{-6}/C^\circ)(20\times10^{9}\,N/m^2)(30\,C^\circ) = 7.2\times10^{6}\,N/m^2$$

هذا الشد ليس بعيدًا عن قدرة تحمل الإسمنت تحت الضغط (الجدول 9 - 2) ويزيد عليه في القصّ والسحب. إذا لم يكن اصطفاف الأسمنت صحيحًا، فإنّ مركبة القوّة ستكون قوّة قص ويكون التشوه محتملا. لهذا تستعمل فواصل ليّنة أو وصلات تمدّد (الشكل 13 - 3) في ممّرات الأرصفة، والطرق السريعة، والجسور.

13-6 قوانين الغازات ودرجة الحرارة المطلقة

إنّ (المعادلة 13-2) ليست ذات فائدةٍ كبيرةٍ لوصف تمدّد الغازات؛ لأنّ التمدّد يمكن أن يكون كبيرًا. ومن جهة أخرى، لأنّ الغازات عادةً تتمدّد لتملأ الوعاء الذي توضع فيه. في الواقع، (المعادلة 13 - 2) تكون ذات معنى فقط إذا أبقينا الضغط ثابتًا. يعتمد حجم الغاز كثيرًا على الضغط بالإضافة إلى درجة الحرارة. لذا، فإنّه مهمٌّ لتحديد العلاقة بين الحجم، والضغط، ودرجة الحرارة، وكتلة الغاز. تسمى مثل هذه العلاقة "**معادلة الحالة**". (نعني بكلمة "الحالة" الظرف الفيزيائي للنظام).

إذا تغيّرت حالة النظام، فعلينا الانتظار حتى يصل الضغط ودرجة الحرارة القيمة نفسها عبره. ولذلك، نعتبر فقط **حالات الاتزان للنظام** – عندما تصبح المتغيّرات التي تصفه (مثل درجة الحرارة والضغط) متماثلة خلاله ولا تتغيّر مع الزمن. نلاحظ أيضًا أن نتائج هذا الجزء تكون دقيقة فقط للغازات غير عالية الكثافة (الضغط ليس كبيرًا، بحدود الضغط الجوي) وليس قريبًا من نقطة السيولة (الغليان).

لكميّةٍ معيّنةٍ من الغاز، فقد وجد تجريبيًّا أنّ - وبتقريب جيد - حجم الغاز يتناسب عكسيًّا مع الضغط الكلّيّ المؤثر فيه عند ثبات درجة الحرارة. أي أنّ

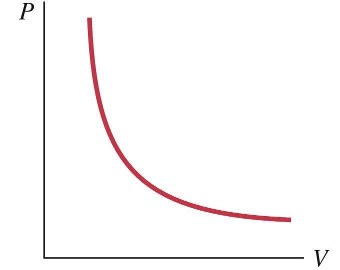
$$V \propto \frac{1}{P} \qquad [T \text{ ثابتة}]$$

حيث P هو الضغط الكلي (ليس "الضغط المقيس" — انظر البند 10 - 4)، فمثلًا إذا ضاعفنا الضغط على غاز، فسينقص الحجم إلى نصف قيمته الأصلية. وتُعرف هذه العلاقة بقانون بويل، نسبة إلى روبرت بويل (1627 -1691)، الذي كان أول من وضعها اعتمادًا على نتائجه العملية. رسم للعلاقة بين P و V عند درجة حرارة ثابتة مبين في (الشكل 13 - 12). ويمكن كتابة قانون بويل (أيضًا بالصورة).

$$PV = \text{ثابت} \qquad [T \text{ ثابتة}]$$

أي أنه عند درجة حرارة ثابتة، إذا تغير الضغط أو الحجم للغاز، فإنّ المتغير الآخر سوف يختلف بحيث يبقى حاصل ضربهما ثابتًا.

قانون بويل



الشكل 13 - 12 الضغط مقابل الحجم لكمية ثابتة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة، يبين العلاقة العكسية تبعًا لقانون بويل: عند نقص الضغط يزيد الحجم.

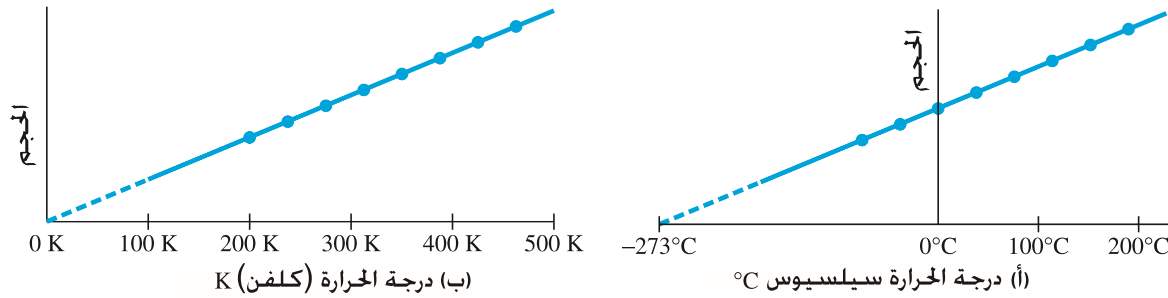
تؤثر درجة الحرارة أيضًا في حجم الغاز، لكن علاقة كمية بين الحجم V ودرجة الحرارة T لم يتم التوصل إليها إلا بعد مرور أكثر من قرن على قانون بويل. وجد الفرنسي جاك شارل (1746–1823) أنه عندما لا يكون الضغط عاليًا ويحفظ ثابتًا، يزداد حجم الغاز مع درجة الحرارة بمعدل ثابت تقريبًا، كما في (الشكل 13 – 13أ).

وعلى أيّ حال، فإنّ الغازات جميعها تسيل عند درجات حرارة منخفضة (مثلاً الأكسجين يسيل عند -183°C)، لذلك لا يمكن امتداد الرسم دون نقطة الإسالة. الرسم في الأساس هو خط مستقيم، وإذا أسقطناه لدرجات حرارة منخفضة، كما يبين الخط المتقطع، فإنه يتقاطع مع المحور عند حوالي -273°C.

مثل هذا المنحنى يمكن رسمه لأي غاز، ودائمًا يمتد الخط إلى -273°C عند الحجم صفر. هذا يبدو أنّه لو برّدنا الغاز إلى -273°C فإنّ حجمه يصبح صفرًا، وعند درجات حرارة أقل يصبح حجمه سالبًا، وهذا ليس له معنى. قد يقال إنّ درجة -273°C هي أقل درجة ممكنة، بالفعل، وهناك الكثير من التجارب الحديثة تشير إلى أن الأمر كذلك. تُسَمّى هذه الحرارة **الصفر المطلق** لدرجة الحرارة. وقد تم تحديد قيمته بأنّها تساوي -273.15°C.

الصفر المطلق

الشكل 13 - 13 حجم كمية معينة من الغاز كدالة (أ) بدرجة الحرارة سيليزيوس . (ب) درجة الحرارة كلفن عندما يحفظ الضغط ثابتًا.



يشكل الصفر المطلق الأساس لتدريج درجة حرارة يُعرف **بالتدريج المطلق** أو **تدريج كلفن**، ويُستعمل على نطاقٍ واسعٍ في المجال العلمي. على هذا التدريج، تحدّد درجة الحرارة بدرجات كلفن أو، يُفضل، كلفن (K) دون استعمال إشارة درجة. الفترات هي نفسها للتدريج سيلزيوس، لكن الصفر على هذا التدريج (0 K) يختار على أنه الصفر المطلق. وهكذا فدرجة تجمد الماء (0°C) هي 273.15 K، أمّا درجة غليان الماء فهي 373.15 K. في الواقع أيّ درجة حرارةٍ على التدريج سيلزيوس يمكن تحويلها إلى كلفن بإضافة 273.15 إليها:

تدريج كلفن

$$T(\text{K}) = T(°\text{C}) + 273.15$$

تحويل بين تدريجي كلفن (المطلق) والسيلزيوس.

الآن، دعنا ننظر إلى (الشكل 13 – 13ب)، حيث العلاقة بين حجم الغاز ودرجة الحرارة المطلقة هي خطٌّ مستقيمٌ يمرُّ بنقطة الأصل. وهكذا، وبتقريب جيّد، فإنّ حجم مقدارٍ معيّنٍ من الغاز يتناسب طرديًّا مع

درجة الحرارة المطلقة عند المحافظة على الضغط ثابتًا. يُسَمّى هذا قانون شارل، ويُكتب

$$V \propto T \qquad [P \text{ ثابت}]$$

قانون شارل

قانون ثالث للغازات، يسمى قانون جاي – لوساك، نسبة إلى جوزيف جاي – لوساك (1778 – 1850)، وينصّ على ما يلي: يتناسب الضغط الكلي للغاز تناسبًا طرديًّا مع درجة الحرارة المطلقة عند ثبات الحجم:

$$P \propto T \qquad [V \text{ ثابت}]$$

قانون جاي – لوساك

هناك مثالٌ شائعٌ وهو أنّ جرّةً مغلقةً أو علبةَ ضباب ($aerosol$) إذا ألقيت في النار سوف تنفجر بسبب زيادة ضغط الغاز الناتج من زيادة درجة الحرارة.

إنّ قوانين بويل، شارل وجاي – لوساك ليست قوانين بالمعنى الذي نستعمله اليوم (دقيق، عميق، واسع نطاق التطبيق)، بل إنّها في الواقع تقريبية، وهي دقيقة للغازات الحقيقية فقط إذا كان ضغط الغاز وكثافته ليسا كبيرين، والغاز ليس قريبًا من درجة الإسالة (التكثيف). إنّ تعبير قانون المطبق على هذه العلاقات أصبح تقليدًا ليس إلا، ولذلك نتمسك بهذا الاستعمال.

المثال المفاهيمي 13-9 لا تُلقِ بزجاجة مغلقة في نار مخيّم.

ماذا يمكن أن يحدث لو ألقيت زجاجة فارغة محكمة الإغلاق في النار، ولماذا؟

الإجابة: داخل الزجاجة ليس فارغًا؛ إنّه مملوءٌ بالهواء. عندما يُسَخّن داخل الزجاجة، تزداد درجة حرارته. يتغيّر حجم الزجاجة قليلًا فقط نتيجة التسخين. وتبعًا لقانون جاي – لوساك يزداد الضغط P داخل الزجاجة بصورة دراماتيكية، ما يكفي لانفجار الزجاجة، راميًا بقطع الزجاجة بعيدًا.

13-7 قانون الغاز المثالي

تم استنتاج قوانين الغازات لبويل، شارل وجاي – لوساك بطريقة مفيدة جدًا في العلوم: أي الحفاظ على متغيّرٍ أو أكثر ثابتًا لملاحظة العلاقة بين متغيرين آخرين. يمكن الآن دمج هذه القوانين في قانونٍ واحد أكثر شموليّةً بين الضغط الكلّيّ، والحجم، ودرجة الحرارة المطلقة لكمية ثابتة من الغاز كما يلي:

$$PV \propto T$$

تبيّن هذه العلاقة كيفيّة تصرّف أيّ من الكميات P، أو V، أو T عند تغيير الكميتين الأخريين، وتؤول هذه العلاقة إلى قوانين، بويل، شارل أو جاي – لوساك عند حفظ درجة الحرارة أو الضغط، أو الحجم على الترتيب، ثابتًا.

أخيرًا، يجب أن ندمج أثر كميّة الغاز الموجودة. كلّ من نفخ بالونًا يعرف أنّه كلّما أجبرنا هواء أكثر داخل البالون، فإنّ البالون يكبر (الشكل 13 - 14). وفي الحقيقة، تبيّن التجارب الدقيقة أنّه عند ثبات درجة الحرارة، والضغط، فإنّ حجم الغاز المحصور V يزداد بزيادة كتلة (m) الغاز الموجود. لذلك نكتب ما يلي:

$$PV \propto mT$$

يمكن تحويل هذا التناسب إلى معادلة بإدخال ثابت تناسب. تبيّن التجارب أنّ هذا الثابت له قيمٌ مختلفةٌ للغازات المختلفة. وعلى أيّ حال، فإنّ ثابت التناسب يصبح نفسه للغازات جميعها، إذا استعملنا عدد المولات بدلًا من الكتلة m.



الشكل 13 - 14 نفخ بالون يعني وضع هواء أكثر (جزيئات هواء أكثر) داخله، وهذا يزيد حجمه. الضغط ثابت تقريبًا (الضغط الجوي) فيما عدا الأثر القليل لمرونة البالون.

مول (وحدة كمية المادة)

يعرف **المول** الواحد (يختصر مولا) بأنه مقدار المادة الذي يحتوي عددا من الذرات أو الجزيئات مساويًا لتلك التي في 12 grams من نظير الكربون -12 (الذي كتلته الذرية بالضبط 12 u). هناك تعريف أبسط ويكافئ هذا التعريف وهو: المول الواحد هو ذلك العدد من الغرامات من مادة يساوي عدديًا الكتلة الجزيئية (البند 13 - 1) من المادة. فمثلاً الكتلة الجزيئية للهيدروجين (H_2) هي 2.0 u (لأنّ كلّ جزيء يحتوي ذرتين من الهيدروجين، وكلّ ذرة كتلها الذرية 1.0 u). وهكذا، فإنّ مولا واحدا من H_2 كتلته 2.0 g. وبطريقة مماثلة، فإنّ مولا واحدا من غاز النيون له كتلة 20 g، وأنّ كتلة مول واحد من CO_2 هي $[12 + (2 \times 16)] = 44$ g لأنّ كتلة الأكسجين الذرية هي 16 (انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي). المول هو الوحدة الرسمية لمقدار المادة في النظام الدولي SI.

وبشكل عام، فإنّ عدد المولات، n، في عينة معينة لمادة نقية يساوي كتلة العينة بالغرامات مقسومة على الكتلة الجزيئية محددة بالغرامات لكلّ مول:

$$n\,(\text{mol}) = \frac{\text{الكتلة}\ (\text{g})}{\text{الكتلة الجزيئية}\ (\text{g/mol})}$$

مثلا، عدد المولات في 132 g من CO_2 (الكتلة الجزيئية 44 u) هو

$$n = \frac{132\ \text{g}}{44\ \text{g/mol}} = 3.0\ \text{mol}$$

قانون الغاز المثالي

يمكننا كتابة معادلة التناسب التي ناقشناها بصورة معادلة كالآتي:

$$PV = nRT \qquad \textbf{(3 – 13)}$$

حيث تمثل n عدد المولات، و R ثابت التناسب. يسمى R ثابت الغازات العام؛ لأنّ قيمته - وجدت تجريبيًا - نفسها للغازات جميعها. قيمة R بوحدات متعددة (فقط الأولى هي وحدة دولية SI).

ثابت الغازات العام.
(بوحدات مختلفة)

$$R = 8.314\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)} \qquad [\text{وحدة SI}]$$
$$= 0.0821\ (\text{L}\cdot\text{atm})/\ (\text{mol}\cdot\text{K})$$
$$= 1.99\ \text{calories/ (mol. K)}.\ *$$

المعادلة (13 - 3) تسمى قانون الغاز المثالي، أو معادلة الحالة للغاز المثالي.

نستعمل التعبير "مثالي" ؛ لأنّ الغازات الحقيقية لا تتبع (المعادلة 13 - 3) بدقة، وخصوصًا عند الضغط العالي (والكثافة) أو عندما يكون الغاز قريبًا من الإسالة (= الغليان). لكن عند ضغوط أقل من الضغط الجوي أو ما شابه، وعندما تكون T بعيدة عن درجة التسييل للغاز، تصبح (المعادلة 13 - 3)دقيقة بصورة كافية ومفيدة للغازات الحقيقية.

تذكر دائمًا عند استعمال قانون الغاز المثالي أنّ درجة الحرارة يجب أن تكون بالمطلق (كلفن) (K)، وأنّ الضغط P يجب أن يكون ضغطًا كليًا وليس ضغطًا مقيسًا (البند 10 – 4).

تنويه:
تعطى قيم T دائمًا بالمطلق (K) وتعطى قيم P بالضغط الكلي، وليس الضغط المقيس.

8-13 حل المسائل بقانون الغاز المثالي.

يعدّ قانون الغاز المثالي أداة مفيدة جدّا، وسنورد بعضا من الأمثلة. كما أننا سنعود كثيرًا إلى "ظروف عيارية" أو "درجة حرارة وضغط عياريين" (STP)، والتي تعني:

$$T = 273\ \text{K}\ \ (0°\text{C})\ \ \text{and}\ \ P = 1.00\ \text{atm} = 1.013 \times 10^5\ \text{N/m}^2 = 101.3\ \text{kPa}$$

$STP = 273\ K,\ 1\ atm$

المثال 13-10 حجم مول واحد عند STP

احسب حجم مول واحد من أيّ غاز، بفرض أنه يتصرف كغاز مثالي، عند الظروف العيارية STP.

النّهج: نستخدم قانون الغاز المثالي، لنحلّ من أجل إيجاد V.

الحلّ: نحلّ لإيجاد V في (المعادلة 13 - 3)

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(1.00\ \text{mol})(8.314\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(273\ \text{K})}{(1.013 \times 10^5\ \text{N/m}^2)} = 22.4 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

بما أنّ $1000\ \text{cm}^3 = 1\times10^{-3}\ \text{m}^3$ لذلك، فإنّ حجم مول واحد من أي غاز هو $V = 22.4$ L عند الظروف العيارية STP.

حجم مول واحد من أيّ غاز في الظروف المعيارية هو $V = 22.4$ L.

* سيعرف كالوري في (البند 14 - 1)؛ أحيانًا يكون من المفيد استعمال R كما هي معطاة بدلالة الكالوري.

وعلينا تذكّر أنّ 22.4 L هو حجم مولٍ واحدٍ من الغاز المثاليّ في الظروف العياريّة STP لتسهيل الحسابات أحيانًا.

التمرين ب : ما حجم مولٍ واحدٍ من الغاز المثاليّ عند 20°C؟

المثال 13 -11 بالون الهيليوم

على فرض أنّ بالون حفلات مملوءً بالهيليوم كرويٌّ تمامًا، ونصف قطره 18.0 cm . وضغطه الداخليّ عند درجة حرارة الغرفة (20°C) يساوي 1.05 atm. أوجد عدد مولات الهيليوم في البالون، وكتلة الهيليوم اللازمة لنفخه.

النّهج: يمكننا استعمال قانون الغاز المثاليّ لحساب n، حيث لدينا P و T، ويمكننا حساب V من نصف القطر المعلوم.

الحلّ: نجد الحجم V من صيغة حجم الكرة:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$
$$= \frac{4}{3}\pi\,(0.180\ \text{m})^3 = 0.0244\ \text{m}^3$$

الضغط معلومٌ ويساوي $1.05\ \text{atm} = 1.064 \times 10^5\ \text{N/m}^2$. يجب التعبير عن درجة الحرارة بالكلفن، لذلك نحسب 20°C تقابل $(20 + 273)\text{K} = 293\ \text{K}$. أخيرًا، نختار قيمة R حيث $R = 8.314\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$ لأننا نستعمل وحدات النظام الدولي SI، أي

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1.064 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(0.0244\ \text{m}^3)}{(8.314\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(293\ \text{K})} = 1.066\ \text{mol}$$

يمكن الحصول على كتلة الهيليوم (الكتلة الذرية = 4.00 g/mol كما تعطى في(الفهرس ب) أو الجدول الدوري) من الكتلة = n × الكتلة الجزئية = $(1.066\ \text{mol})(4.00\ \text{g/mol}) = 4.26\ \text{g}$

تطبيق الفيزياء
الكتلة (والوزن) للهواء في غرفة.

المثال 13 -12 احسب بالتقريب كتلة الهواء في غرفة.

احسب بالتقريب كتلة الهواء في غرفة أبعادها $5\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 2.5\ \text{m}$ عند الظروف العيارية STP.

النّهج: نحسب أولا عدد المولات باستخدام الحجم المعلوم n. ثم نضرب في كتلة المول الواحد للحصول على الكتلة الكلية.

الحلّ: يشير (مثال 13 - 10) إلى أنّ المول الواحد عند 0°C حجمه 22.4 L حجم الغرفة هو $5\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 2.5\ \text{m}$

$$n = \frac{(5\ \text{m})(3\ \text{m})(2.5\ \text{m})}{22.4 \times 10^{-3}\ \text{m}^3} \approx 1700\ \text{mol}$$

الهواء هو مزيج من الغازات: حوالي 20% أكسجين (O_2)، و 80% نيتروجين (N_2) ولذلك، فإنّ الكتلة الجزيئية هي $2 \times 16\ \text{u} = 32\ \text{u}$ و $2 \times 14\ \text{u} = 28\ \text{u}$، على الترتيب، أي بمتوسط حوالي 29 u. وهكذا، فإنّ كتلة مولٍ واحدٍ من الهواء هي $29\ \text{g} = 0.029\ \text{kg}$ تقريبًا. إذن، كتلة الهواء في الغرفة المذكورة أعلاه هي:

$$m \approx (1700\ \text{mol})(0.029\ \text{kg/mol}) \approx 50\ \text{kg}$$

ملحوظة: هذا حوالي 100 1bs من الهواء.

التمرين جـ: عند أيّ من 20°C، و 0°C تكون كتلة الهواء أكبر أو أقلّ؟

في كثيرٍ من الأحيان، يُعبّر عن الحجم باللترات والضغط بالضغط الجوي. وبدل تحويل هذه إلى الوحدات الدولية SI، يمكننا استعمال قيمة R المعطاة في (البند 13 - 7) بـ $0.0821\ \text{L}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$
في كثيرٍ من المواقف، لا تحتاج إلى استعمال قيمة R على الإطلاق. مثلاً، كثير من المسائل تتضمن تغيّرًا في الضغط، ودرجة الحرارة والحجم لمقدار محدد من الغاز، $PV/T = nR$ = ثابت، لأنّ n و R ثابتة.

حل المسألة

استعمال قانون الغاز المثالي كنسبة.

إذا افترضنا أنّ P_1، و V_1، و T_1 تعبّر عن المتغيّرات المناسبة ابتداءً، و P_2، و V_2 و T_2 تمثّل المتغيّرات بعد حدوث التغيّر، عندها يمكننا كتابة ما يلي:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

إذا عرفنا أيّ خمسٍ من الكميات المبيّنة في المعادلة، فهذا يساعدنا على معرفة السادسة. أو، إذا كان أحد المتغيّرات الثلاث ثابتًا، ($T_1 = T_2$ أو $P_1 = P_2$ أو $V_1 = V_2$) فيمكننا عند ذلك حلّ المعادلة لإيجاد مجهول واحد، مع معرفة الكميات الثلاث الأخرى.

تطبيق الفيزياء

الضغط في دولاب حار.



الشكل 13-15 (مثال 13-13).

حل المسألة

لا يُستعمل الضغط المقيس أو درجة الحرارة °C في قانون الغاز المثالي.

المثال 13-13 **اختبر العجلات وهي باردة.**

تمّ ملء إطار سيارة (الشكل 13 - 15) لضغط مَقيس مقداره 200 kPa عند درجة 10°C. وبعد مسافة 100 km ترتفع الحرارة داخل الإطار إلى 40°C. ما قيمة الضغط داخل الإطار الآن؟

النّهج: لا نعرف عدد مولات الغاز داخل الإطار، أو حجم الإطار، ولكن نعرف أنّهما ثابتان. لذا، نستعمل صيغة النسبة لقانون الغاز المثالي.

الحل: بما أنّ $V_1 = V_2$، فإنّ

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

هذه صيغة قانون جاي- لوساك. وبما أنّ الضغط المعطى هو الضغط المقيس (البند 10 - 4)، فيجب أن نضيف الضغط الجوي (=101 kPa) للحصول على الضغط الكلي $P_1 = (200\,\text{kPa} + 101\,\text{kPa}) = 301\,\text{kPa}$. نحوّل كذلك درجة الحرارة إلى الكلفن بإضافة 273، ونحلّ لإيجاد P_2.

$$P_2 = P_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (3.01 \times 10^5\,\text{Pa})\left(\frac{313\,\text{K}}{283\,\text{K}}\right) = 333\,\text{kPa}$$

نطرح الضغط الجوي للحصول على الضغط المقيس. ويساوي 232 kPa، ويساوي 16% زيادة. يبين هذا المثال لماذا تقترح تعليمات السيارات فحص ضغط العجلات عندما تكون الاطارات باردة.

ملحوظة: عند استعمال قانون الغاز المثالي، يجب أن تكون درجات الحرارة بالكلفن (K) والضغط P بالضغط الكلي، وليس الضغط المقيس.

9-13 قانون الغاز المثالي بدلالة الجزيئات: عدد أفوجادرو.

عدد أفوجادرو.

تعدّ الحقيقةُ القائلة إنّ ثابت الغاز R له القيمة نفسها للغازات كلّها ملحوظةً مهمّة لسهولتها في الطبيعة. لقد أدرك العالم الإيطالي أميديو أفوجادرو (1776 – 1856) ذلك أولاً، ولكن بشكلٍ مختلفٍ قليلًا. قال أفوجادرو: "الحجوم المتساوية من الغاز عند درجة الحرارة والضغط نفسيهما تحتوي عددًا متساويًا من الجزيئات. يدعى ذلك أحيانًا فرضية أفوجادرو. ونلاحظ أنّ ذلك ينسجم مع كون R هو نفسه للغازات كلّها، ويمكن إدراكه كما يلي. قبل كلّ شيء، سنرى من (المعادلة 13 - 3) أنه بعدد المولات نفسها n، وبالضغط ودرجة الحرارة نفسيهما، سيكون الحجم نفسه للغازات جميعها ما دام R نفسه. ثانيًا، عدد الجزيئات في مول واحد هو نفسه للغازات جميعها. وهكذا، *فإنّ فرضية أفوجادرو تكافئ أن R هو ذاته للغازات كلها.

يُسَمّى عدد الجزيئات في مولٍ واحدٍ لأيّ مادّةٍ نقيّةٍ عدد **أفوجادرو**، N_A. وعلى الرغم من أنّ أفوجادرو هو صاحب الفكرة، إلا أنّه لم يكن قادرًا على حساب هذا العدد N_A. وفي الواقع، فإنّ الأقيسة الدقيقة له لم تتوافر قبل القرن العشرين.

* مثلاً الكتلة الجزيئية للهيدروجين H_2 هي 2.0 u (وحدة كتلة ذرية)، أما لغاز O_2 فهي 32.04 u. وهكذا، فإنّ مولًا واحدًا من H_2 كتلته 0.0020 kg، ومولًا واحدًا من O_2 (غاز) كتلته 0.0320 kg. إنّ عدد الجزيئات في مول واحد يساوي حاصل قسمة الكتلة الكلية للمول M على m كتلة جزيء واحد. وبما أنّ هذه النسبة M/m هي نفسها للغازات جميعها من خلال تعريف المول، فإنّ المول الواحد من أيّ غاز يجب أن يحوي العدد نفسه من الجزيئات.

وهناك عددٌ من الطرق لقياس N_A، والقيمة المقبولة حاليًا هي:

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}$$ [جزيء/ مول]

عدد أفوجادرو

وبما أنّ العدد الكلّيّ للجزيئات N في غازٍ يساوي العدد لكلّ مولٍ مضروبًا في عدد المولات ($N = nN_A$)، فإنّ قانون الغاز المثالي -(المعادلة 13 - 3) يمكن كتابته بدلالة عدد الجزيئات الموجودة:

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A}RT$$

أو

$$PV = NkT \qquad (4-13)$$

قانون الغاز المثالي (بدلالة الجزيئات)

حيث $k = R/N_A$ يُدعى ثابت بولتزمان وله قيمة تساوي

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.314\ \text{J/mol}\cdot\text{K}}{6.02 \times 10^{23}/\text{mol}} = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$$

ثابت بولتزمان.

تطبيق الفيزياء

الجزيئات في شهيق واحد.

المثال 13-14 كتلة ذرة الهيدروجين

استعمل عدد أفوجادرو لتحديد كتلة ذرة الهيدروجين.

النّهج: كتلة ذرة واحدة تساوي كتلة مولٍ واحدٍ مقسومًا على عدد الذرّات في مولٍ واحد، N_A.

الحلّ: إنّ المول الواحد من ذرّات الهيدروجين (الكتلة الذرية= 1.008 u البند 13 - 1 أو الملحق B) له كتلة 1.008×10^{-3} kg ويحتوي 6.02×10^{23} ذرّة. لذا، فالذرّة الواحدة لها كتلة:

$$m = \frac{1.008 \times 10^{-3}\ \text{kg}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

ملحوظة: تاريخيًّا، العملية المعاكسة كانت إحدى طرائق حساب عدد أفوجادرو N_A: أي أنّ قيمةً دقيقةً لعدد أفوجادرو N_A يمكن الحصول عليها من قياسٍ دقيقٍ لكتلة ذرة الهيدروجين.

المثال 13-15 كم عدد الجزيئات في شهيق واحد؟

خمّن عدد الجزيئات التي تتنفسها في شهيق لتر واحد.

النّهج: نحسب كم مولا يساوي اللتر الواحد باستعمال نتيجة (المثال 13 - 10) حيث إنّ المول الواحد له حجم 22.4 L عند الظروف العيارية STP، ثم نضرب ذلك في عدد أفوجادرو N_A لنجد عدد الجزيئات في هذا الحجم من المولات.

الحلّ: المول الواحد يقابل 22.4 L عند STP، لذلك 1.0 L من الهواء يقابل $(1.0\ \text{L})/(22.4\ \text{L/mol}) = 0.045\ \text{mol}$. وعليه، فإنّ اللتر الواحد من الهواء يحتوي على جزيء $(0.045\ \text{mol})(6.02 \times 10^{23}$ جزيء/ مول$) \approx 3 \times 10^{22}$ جزيء

13-10 نظرية الحركة والتفسير الجزيئي لدرجة الحرارة

إنّ تحليل تركيب المادة بدلالة الذرات دائمة الحركة العشوائية يدعى نظريّة الحركة. وسنبحث الآن في خصائص الغازات من وجهة نظرية الحركة التي تعتمد على أسس الميكانيكا الكلاسيكية. ولكن تطبيق قوانين نيوتن لكلّ جزيءٍ من العدد الهائل من جزيئات الغاز ($> 10^{25}/\text{m}^3$ عند STP) أبعد بكثير عن قدرة أيّ حاسوب. وبدلًا من ذلك، نأخذ منحنى إحصائيًّا، ونحدّد المتوسط لكميات معيّنة، وهذه المتوسطات تقابل متغيّرات جاهرية. نريد طبعًا، أن يقابل وصفنا المجهري الخصائص الجاهرية للغازات، وإلّا فإنّ نظريتنا ستكون قليلة الفائدة.
والأكثر أهميةً من ذلك، فإنّنا سنصل إلى علاقة مهمّة بين الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات في غاز من جهة ودرجة الحرارة المطلقة من جهة أخرى.

وسنجري الفرضيّات التالية على الغاز، حيث تعكس هذه الفرضيات نظرة بسيطة إليه، ولكن بغض النظر، فإنّ النتائج التي سنتوصل إليها تعود إلى الصفات الأساسية للغازات الحقيقية عند الضغوط القليلة وبعيدة عن درجة الإسالة. عند هذه الظروف، تتبع الغازات الحقيقية قانون الغاز المثالي. وفي الواقع، فإنّ الغاز الذي نضعه الآن نرجع اليه على أنّه **الغاز المثالي**. وفيما يلي الفرضيات التي تمثل المسلمات الأساسية لنظرية الحركة:

مسلمات نظرية الحركة

1. هناك عددٌ كبيرٌ من الجزيئات، N، كتلة كلّ منها m، تتحرك حركة عشوائية بسرعات مختلفة. وتنسجم هذه الفرضية مع ملاحظتنا أنّ الغاز يملأ الوعاء الذي يحل فيه، وكذلك في حالة الهواء على الأرض، فإنّه يحفظ من الإفلات بواسطة قوّة الجاذبية فقط.

2. الجزيئات في المتوسط بعيدة عن بعضها. أي أنّ هناك فاصلاً متوسطًا أكبر بكثير من قطر الجزيء.

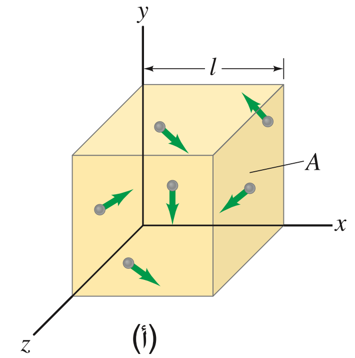
3. نفترض أنّ الجزيئات تتبع قوانين الميكانيكا الكلاسيكيّة، ويُفترض أن يتفاعل أحدها مع الآخر عند التصادم فقط. ورغم أنّ الجزيئات تؤثّر بقوى جذبٍ ضعيفةٍ بين التصادمات، فإنّ طاقة الوضع المرافقة لهذه القوى تكون قليلةً بالمقارنة مع الطاقة الحركيّة، وسوف نهملها في الوقت الحاضر.

4. يفترض أن تكون التصادماتُ بين الجزيئات أو مع جدران الوعاء تامّةَ المرونة، وهي تدوم لفترة صغيرة جدًّا قبل التصادمات مقارنة مع الزمن بينها. عندها تستطيع إهمال طاقة الوضع المرافقة للتصادمات مقارنةً بالطاقة الحركيّة بين التصادمات.

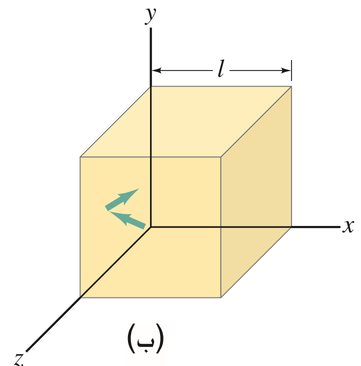
تفسير قانون بويل

نستطيع أن نرى فورًا كيف أنّ هذه النظريّة الحركيّة للغاز تفسر قانون بويل (البند 13-6). ويُعزى الضغط الناشئ على جدران الوعاء الذي يحتوي على الغاز إلى القذف المستمرّ للجزيئات. إذا أنقصنا الحجم إلى النصف (مثلاً تكون الجزيئات متقاربة أكثر) فإنّ عدد الصدمات يتضاعف لكلّ وحدة مساحة من الجدار في الثانية. ونتوقع أن يصبح الضغط ضعف قيمته وهو ما يتفق مع قانون بويل.

دعنا نحسب الآن بصورةٍ كمّيّةٍ ضغط الغاز المؤثّر في الوعاء الذي يحويه اعتمادًا على نظرية الحركة. سنتخيل أنّ الجزيئات موجودة داخل وعاء بشكل متوازي مستطيلات (ساكنًا) جوانبه لها مساحة A ، وطول ضلعه l، كما هو مبين في (الشكل 13 – 16أ).



(أ)



(ب)

الشكل 13 - 16 (أ) جزيئات غاز تتجول في وعاء متوازي مستطيلات.
(ب) تشير الأسهم للزخم لجزيء واحد عند ارتداده عن الجدار.

إنّ الضغط الناتج من الغاز على الجدران- تبعًا لنموذجنا- يحدث بسبب التصادمات بين الجزيئات والجدران. دعنا نركز اهتمامنا على الجدار الذي مساحته A عند الطرف الأيسر للوعاء، ونتفحص ماسيحدث عندما يصطدم به جزيء، كما هو واضح في (الشكل 13 – 16ب). يؤثر هذا الجزيء بقوّة في الجدار. واستنادا إلى قانون نيوتن الثالث: يؤثر الجدار بقوّةٍ مساويةٍ ومعاكسةٍ في الجزيء. إنّ مقدار هذه القوّة على الجزيء وتبعًا لقانون نيوتن الثاني يساوي معدل تغير الزخم الخطي، $F = \Delta(mv)/\Delta t$ (المعادلة 7-2) ، وعلى افتراض أنّ التصادم مرن، فإنّ المركبة السينية لزخم الجزيء فقط هي التي تتغيّر، ويكون تغيّرها من $-mv_x$ إلى $+mv_x$. وهكذا التغير في الزخم الخطي للجزيء، $\Delta(mv)$، وهو الزخم النهائي مطروحًا منه الزخم الابتدائي، يساوي

$$\Delta(mv) = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

ولتصادم واحد، فإنّ هذا الجزيء سيقوم بتصادمات كثيرة على الجدار، وكلُّ تصادم مفصول بزمن Δt، وهو الزمن اللازم للجزيء كي ينتقل عبر الوعاء ويعود ثانية، مسافة مساوية $(2l)$.
وهكذا $2l = v_x \, \Delta t$، أو

$$\Delta t = \frac{2l}{v_x}$$

إنّ الزمن Δt بين التصادمات صغيرٌ جدًّا. لذا، يكون عدد التصادمات في الثانية كبيرٌ جدًا. ولهذا، فإنّ القوّة المتوسطة – يُؤخذ معدّلها لعددٍ كبيرٍ من التصادمات – سوف تساوي التغيّر في الزخم خلال تصادمٍ واحدٍ مقسومًا على الزمن بين التصادمات (قانون نيوتن الثاني):

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2l/v_x} = \frac{mv_x^2}{l} \qquad \text{(ناتج من جزيء واحد)}$$

وخلال مروره إلى الأمام والخلف عبر الوعاء، يمكن أن يصطدم الجزيء مع قمة الوعاء أو قعره ، ولكن ذلك لا يغير المركبة x للزخم. لذا، فإنّه لا يؤثر في النتيجة. كما أنّه قد يصطدم بغيره من الجزيئات والذي قد يغير v_x. وعلى أيّ حال، فإنّ أي فقد (أو كسب) في الزخم سوف تناله الجزيئات الأخرى، وبما أننا سنجمع على الجزيئات جميعها، فإنّ هذا الأثر سوف يكون متضمنًا. ولذلك، فإنّ نتيجتنا السابقة غير مختلفة.

إنّ القوّة الحقيقية الناتجة من جزيء واحد سوف تكون متقطعة، ولكن بسبب العدد الهائل من الجزيئات التي تصدم الجدار في الثانية، فإنّ القوّة، بالمتوسط، تبقى ثابتة. ولحساب القوّة الناتجة من الجزيئات كلها في الوعاء: علينا إضافة المساهمة من هذه الجزيئات جميعها. ولهذا، فالقوّة المحصلة على الجدار هي

$$F = \frac{m}{l}\left(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \cdots + v_{xN}^2\right)$$

حيث v_{x1} هي v_x للجزيء رقم 1 (حيث يجري ترقيم الجزيئات اختياريًا)، والجمع يجري على الجزيئات جميعها، والتي عددها N في الوعاء. القيمة المتوسطة لمربع المركبة x السرعة هي

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \cdots + v_{xN}^2}{N} \quad \textbf{(5 – 13)}$$

وهكذا يمكن كتابة القوّة بالصورة

$$F = \frac{m}{l} N\overline{v_x^2}$$

نعرف أن مربع أيّ قيمة يساوي مجموع مربّعات مركباته (نظرية فيثاغورس). وهكذا $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ لأيّ سرعة v. وبأخذ المتوسط نجد

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

وبما أنّ سُرعات الجزيئات تكون عشوائية، فليس هناك تفضيل لأيّ اتجاه على آخر، ولذلك نحصل على

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

وبجمع هـه العلاقة مع العلاقة التي تسبقها نحصل على

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

نعوض ذلك في معادلة القوّة F:

$$F = \frac{m}{l} N \frac{\overline{v^2}}{3}$$

وبهذا، فإنّ الضغط على الجدار يساوي

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{3}\frac{Nm\overline{v^2}}{V}$$

أو

$$P = \frac{1}{3}\frac{Nm\overline{v^2}}{V} \quad \textbf{(6 – 13)}$$

الضغط في الغاز

حيث $V = lA$ هو حجم الوعاء. وهذه هي النتيجة التي كنّا نبحث عنها: الضغط الناتج من غازٍ على جدران الوعاء الذي يحويه بدلالة خصائص الجزيئات.

ويمكن كتابتها في المعادلة (13 – 6)، $P = \frac{1}{3}N m\overline{v^2}/V$ ، بصورة أوضح بضرب طرفيها في V وترتيب الجانب الأيمن:

$$PV = \frac{2}{3}N\left(\frac{1}{2}m\overline{v^2}\right) \qquad \textbf{(7 – 13)}$$

الكميّة $\frac{1}{2}m\overline{v^2}$ هي متوسط الطاقة الحركية $(\overline{KE})$ لجزيئات الغاز إذا قارنّا (المعادلة 13-7) (بالمعادلة 13 - 4)، قانون الغاز المثالي $PV = NkT$ فسنرى أنّ القانونين يتفقان إذا:

$$\frac{2}{3}\left(\frac{1}{2}m\overline{v^2}\right) = kT$$

أو :

درجة الحرارة مرتبطة بمتوسط الطاقة الحركية للجزيئات

$$\overline{KE} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \qquad \textbf{(8 – 13)} \text{ [الغاز مثالي]}$$

وتخبرنا هذه المعادلة بما يلي:

تتناسب الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات ذات الحركة العشوائية في الغاز المثالي تناسبا طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة للغاز.

كلّما كانت درجة الحرارة أعلى بناء على النظرية الحركية، كانت سرعة الجزيئات أكبر بالمتوسط. هذه العلاقة هي أحد انتصارات النظرية الحركية.

المثال 13-16 الطاقة الحركية للجزيئات

ما الطاقة الحركية الانتقالية المتوسطة للجزيئات في غازٍ مثاليٍّ عند درجة 37°C؟

النّهج: نستعمل درجة الحرارة المطلقة في (المعادلة 13 - 8).

الحلّ: نحول 37°C إلى $310\ K$ ونعوضها في (المعادلة 13 - 8):

$$\overline{KE} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})(310\ \text{K}) = 6.42 \times 10^{-21}\ \text{J}$$

ملحوظة: الطاقة الحركية الكلية لمول واحدٍ من الجزيئات تساوي $(6.42 \times 10^{-21}\ \text{J})(6.02 \times 10^{23}) = 3900\ \text{J}$، وهي تساوي الطاقة الحركية لحجر كتلته 1-kg يسير بسرعةٍ أكبر من 85 m/s.

تنطبق (المعادلة 13 - 8) ليس على الغازات فقط، بل وعلى السوائل والجوامد كذلك بدقةٍ معقولة. وهكذا، فنتيجة (المثال 13 - 16) تنطبق على الجزيئات في الخلايا الحية لجسم بدرجة (37°C).

سرعة مربع معدل الجذر (rms).

يمكننا استعمال (المعادلة 13 - 5) لحساب متوسط سرعة حركة الجزيئات. لاحظ أنّ المتوسط في(المعادلة 13 - 8) هو لمربع السرعة. ويُسَمّى الجذر التربيعي لـ $\overline{v^2}$ سرعة $(root - mean\text{-}\ square)$ جذر - متوسط – المربع، v_{rms} (لأننا نأخذ الجذر التربيعي لمتوسط مربع السرعة):

سرعة الجزيئات (rms).

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \qquad \textbf{(9 – 13)}$$

المثال 13-17 سرعات جزيئات الهواء

ما سرعةُ جذرٍ متوسّطِ المربّع $(O_2$ و $N_2)$ عند درجة حرارة الغرفة (20°C)؟

النّهج: للحصول على v_{rms}: نحتاج إلى كتلة O_2 و N_2، ثم نطبق (المعادلة 13 - 9) على الأكسجين والنيتروجين منفصلين لأنّ كتلتيهما مختلفتان.

الحلّ: كتلة جزيء واحد من O_2 (الكتلة الجزيئية = 32 u) و N_2 (الكتلة الجزيئية = 28 u) (حيث $1\ u = 1.66 \times 10^{-27}$ kg).

$m(O_2) = (32)\ (1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg}) = 5.3 \times 10^{-26}\ \text{kg}$.

$m(N_2) = (28)\ (1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg}) = 4.6 \times 10^{-26}\ \text{kg}$.

وبالتالي للأكسجين:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{(3)(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})(293\ \text{K})}{(5.3 \times 10^{-26}\ \text{kg})}} = 480\ \text{m/s}$$

والنيتروجين $v_{rms} = 510\ \text{m/s}$ * هاتان السرعتان v أكبر من 1700 km/h أو 1000 mi/h.

* السرعة v_{rms} هي مقدار فقط. يكون متوسط السرعة المتجهة للجزيئات صفرًا: السرعة المتجهة لها اتجاه. وكما تتحرك بعض الجزيئات نحو اليمين يتحرك مثلها أيضًا نحو اليسار.

التمرين د: ما السرعة التي يتحرك بها مشبك ورق كتلته 1-g إذا كان له الطاقة الحركيّة نفسها للجزيء في (المثال 13 - 17)؟

تتضمّن (المعادلة 13 - 8)، $\overline{\mathrm{KE}} = \frac{3}{2}kT$ أنّه عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق، تقترب الطاقة الحركية للجزيئات من الصفر. وتخبرنا نظرية الكم الحديثة أنّ الوضع ليس كذلك بالضبط. بدلًا من ذلك، وعند الاقتراب من الصفر المطلق، تقترب الطاقة الحركية من قيمة صغيرة جدًا ولا تساوي صفرًا. وعلى الرغم من أنّ الغازات الحقيقية كلها تصبح سائلة أو صلبة عند 0 K، فإنّ الحركة الجزيئية لا تتلاشى، حتى عند الصفر المطلق.

* 13-11 توزيع السرعات الجزيئية

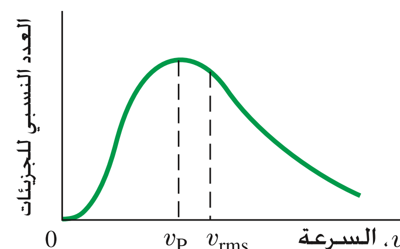
فرضنا أنّ جزيئات الغاز في حالة حركة عشوائية، وهذا يعني أنّ كثيرًا من هذه الجزيئات لها سرعة أقلّ من سرعة جذر متوسط المربع، في حين أنّ لبعضها سرعات أكبر منها. توصّل جيمس كلارك ما كسويل (1831 – 1879) في عام 1859 إلى أنّ سرعات الجزيئات تتوزع تبعًا للرسم في (الشكل 13 - 17)، معتمدا على النظرية الحركية. وهذا ما يسمى **بتوزيع ماكسويل للسرعات***. تتفاوت السرعات من صفر حتى قيم أكبر بكثير من v_{rms}، لكن وكما يبين الشكل، فإنّ معظم الجزيئات لها سرعات ليست بعيدة عن السرعة المتوسطة. أقلّ من 1% من الجزيئات تزيد على أربعة أضعاف v_{rms}.

توزيع ماكسويل للسرعات جزيئات الغاز.

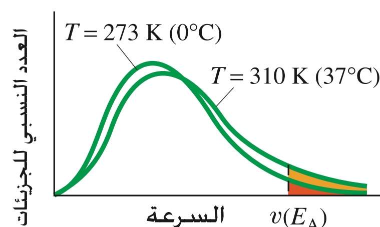
بدأت التجارب لإيجاد التوزيع في الغازات الحقيقية في عام 1920. وقد أكدت بدقة كبيرة توزيع ماكسويل والتناسب الطردي بين متوسط الطاقة الحركية ودرجة الحرارة المطلقة، (المعادلة 13 - 8).

يبين (الشكل 13 - 18) توزيع ماكسويل لدرجتي حرارة مختلفتين: تمامًا كما تزيد v_{rms} مع درجة الحرارة، كذلك فإنّ منحنى التوزيع كلّه ينزاح نحو اليمين عند درجات الحرارة العالية. يبين هذا الشكل كيف تفسر الطاقة الحركية زيادة سرعة التفاعلات الكيماوية، بما في ذلك تفاعلات الخلايا الحية عند زيادة درجة الحرارة قد يتفاعل جزيئان كيماويان فقط إذا كانت طاقتهما أكبر من قيمة دنيا معينة (تُسَمّى طاقة التنشيط)، E_{A}، مثلما عند تصادمهما، فإنّهما يخترقان بعضهما بعض الشيء. يبين (الشكل 13 – 18) أنّه عند درجة حرارة أعلى، فإنّ كثيرًا من الجزيئات تملك سرعاتٍ وطاقاتٍ حركيّة KE أعلى من طاقة العتبة E_{A}.

تطبيق الفيزياء
كيف تعتمد التفاعلات الكيميائية على درجة الحرارة؟



الشكل 13 - 17 توزيع السرعات لجزيئات غاز مثالي. لاحظ أنّ v_{rms} ليست عند قمة المنحنى (هذه السرعة تسمى الأكثر احتمالية v_{P})؛ لأنّ المنحنى يميل إلى اليمين وهو غير متماثل.



الشكل 13 - 18 توزيع سرعات الجزيئات لدرجتي حرارة مختلفتين.

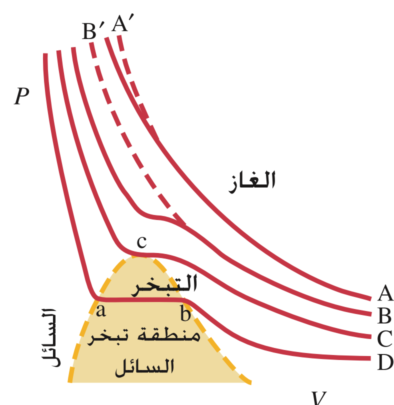
* 13-12 الغازات الحقيقية وتغيرات الطور

يعدّ قانون الغاز المثالي وصفًا دقيقًا لتصرّف الغاز الحقيقيّ ما دام الضغط ليس عاليًا، وما دامت درجة الحرارة بعيدةً عن نقطة الإسالة. ولكن ماذا يحدث عندما لا يتحقّق هذان المعياران؟ أولًا، سنناقش تصرّف الغاز الحقيقي، ثمّ نفحص كيف تساعدنا الطاقة الحركيّة على فهم هذا التصرّف.

* رياضيًا، يُعطى التوزيع بـ $\Delta N = Cv^2 \exp\left(-\frac{1}{2}mv^2/kT\right)\Delta v$ حيث ΔN عدد الجزيئات التي لها سرعة بين v و $v + \Delta v$، C ثابت، و exp تعني أنّ التعبير بين قوسين هو أسّ بالعدد الطبيعي $e = 2.718...$.

مخطط PV

دعنا نلقي نظرةً على منحنى للضغط مرسومٍ مقابل الحجم لكميّةٍ معيّنةٍ من الغاز. على هذا "المخطّط PV" (الشكل 13 – 19) تمثّل كلّ نقطةٍ حالة اتزان للمادة المعطاة. المنحنيات المختلفة (المشار إليها بـ A, B, C, D) تبيّن كيف يتغيّر الضغط عند تغيّر الحجم مع تثبيت درجة الحرارة لقيمٍ متعدّدة من درجات الحرارة. ويمثّل المنحنى المتقطع A تصرف الغاز المثالي، أي ثابت = PV. في حين يشير المنحنى المتصل A إلى تصرف الغاز الحقيقي عند درجة الحرارة نفسها. لاحظ أنّه عند الضغط العالي، يكون حجم الغاز الحقيقي أقلّ من القيمة التي تنتج من قانون الغاز المثالي. ويمثل المنحيين B, C في (الشكل 13 – 19) الغاز عند درجاتِ حرارةٍ أقلّ، ونرى أنّ التصرّف ينحرف أكثر عن المنحنيات الناتجة من قانون الغاز المثالي (مثلًا المنحنى B´) ويكون الانحراف أكبر كلّما اقتربنا من درجة الإسالة.



الشكل 13 - 19 مخطط PV لمادة حقيقية. المنحنيات A, B, C, D تمثل الغاز نفسه عند درجات حرارة مختلفة. ($T_A > T_B > T_C > T_D$)

لتفسير ذلك: نلاحظ أنّه عند ضغط أعلى نتوقع أن تقترب الجزيئات من بعضها. وبشكلٍ خاص عند درجات حرارة أقلّ، وأنّ طاقة الوضع المرافقة لقوى التجاذب بين الجزيئات (سبق إهمالها) لم تعد مهملة مقارنة بالطاقة الحركية المنخفضة الآن للجزيئات. تؤدي قوى التجاذب هذه إلى تقريب الجزيئات أكثر بحيث (عند ضغط معيّن) يكون الحجم أقلّ ممّا نتوقّعه من قانون الغاز المثالي. وعند درجة حرارةٍ أقلّ، تسبب هذه القوى الإسالة، وتصبح الجزيئات قريبة جدّا من بعضها.

يمثل المنحنى D الوضع عندما تحدث الإسالة. وعند ضغط منخفض على هذا المنحنى D (إلى يمين الشكل 13 - 19)، فإنّ المادة هي غاز، وتمثل حجمًا كبيرًا. وعند زيادة الضغط، يقلّ الحجم حتى نصل النقطة b. وبعد النقطة b، يقلّ الحجم دون تغير الضغط، وتتحول المادة تدريجيّا من طور الغاز إلى طور السائل. وعند النقطة a، تتحول المادة كلّها إلى سائل. إنّ الزيادة الإضافية في الضغط تقلل الحجم بكمية قليلة – السوائل (تقريبًا) غير قابلة للانضغاط – لذلك، (إلى اليسار) فإنّ المنحنى يكون شديد الانحدار كما هو مبين. تمثل المنطقة المظللة تحت الخط المتقطع المنطقة التي يكون فيها السائل والغاز في حالة اتزان.

النقطة الحرجة

يمثل المنحنى C في (الشكل 13 - 19) تصرف المادة عند درجة حرارتها الحرجة؛ تُسَمّى النقطة C (النقطة الوحيدة التي يكون فيها المنحنى أفقيًّا) **النقطة الحرجة**. وعند درجات حرارة أقلّ من الدرجة الحرجة. (وهذا هو تعريف الكمية)، سوف يتحول الغاز إلى الطور السّائل إذا أثرنا بضغط كاف. وفوق درجة الحرارة الحرجة هذه، لا يوجد مقدار من الضغط يمكن أن يسبب تغير طور الغاز ليصبح سائلا: لا تتشكل سطح السائل. توجد درجات الحرارة الحرجة لغازات مختلفة في (الجدول 13 - 2). حاول العلماء على مدى سنين إسالة الأكسجين دون جدوى. ولكن بعد اكتشاف النقطة الحرجة فقط، تمّ إدراك أنّ إسالة الأكسجين ممكن فقط إذا برّدناه أولًا دون درجة الحرارة الحرجة -118°C.

البخار والغاز

عادة، يتم التمييز بين التعبيرين "غاز" و "بخار"؛ حيث تُسَمّى المادة دون درجة حرارتها الحرجة في الحالة الغازية "بخارًا"، في حين تسمى "غازًا" فوق الدرجة الحرجة هذه.

مخطط بياني للطور

يمكن رسم تصرف المادة على منحنى PT، وليس على منحنى PV فقط. يُسَمّى المنحنى PT عادةً "منحنى الطور"، ويكون مناسبًا خاصّةً لمقارنة الأطوار المختلفة للمادة.

الجدول 13 - 2 درجات الحرارة والضغوط الحرجة

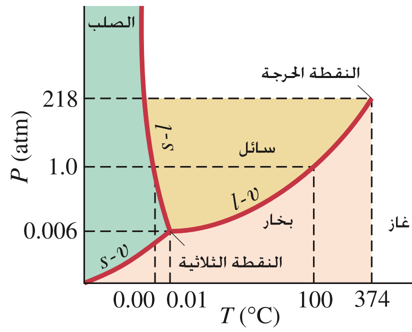
المادة	درجات الحرارة الحرجة °C	K	الضغط الحرج (ضغط جوي)
ماء	374	647	218
CO_2	31	304	72.8
أكسجين	– 118	155	50
نيتروجين	– 147	126	33.5
هيدروجين	– 239.9	33.3	12.8
هيليوم	– 267.9	5.3	2.3

يبين (الشكل 13 – 20) مخطّط الطور للماء. ويمثّل المنحنى المُشار إليه بـ l-v تلك النقاط حيث يكون طور السائل والبخار في حالة اتزان – لذلك فهو رسم لدرجة الغليان مقابل الضغط. لاحظ أنّ المنحنى يبين بصورة صحيحة أنه عند ضغط 1 ضغط جوي، فإنّ درجة الغليان هي 100°C، وأن هذه الدرجة تتناقص بانخفاض الضغط. أمّا المنحنى s-l، فيمثّل النقاط حيث يكون كلٌّ من الصلب والسائل في حالة اتزان، وبالتالي فهو منحنى لدرجات التجمد كما هو مبين. لاحظ أيضًا أنّه في (الشكل 13 - 20) وعند الضغط 1 atm، تكون المادة في حالة سيولة بين درجة 0°C و 100°C **وقتها. ولكنّها يكون في طول الحالة الصلبة أو السائلة إذا كانت درجة الحرارة أقل من** 0°C أو أكبر من 100°C. في حين يشير المنحنى s-v إلى منحنى درجة التسامي مقابل الضغط. إنّ درجة التسامي تعود إلى العملية التي يتحول فيها الصلب عند الضغط المنخفض مباشرة إلى طور البخار دون المرور في حالة السيولة. يحدث التسامي للماء إذا كان ضغط بخار الماء أقلّ من 0.0060 ضغط جوي (atm). يُسمّى ثاني أكسيد الكربون في الحالة الصلبة الجليد الجاف، وهو يتسامى حتى عند الضغط الجوّيّ العاديّ.

إنّ تقاطع المنحنيات الثلاث في (الشكل 13 - 20) هي النقطة الثلاثيّة. ويحدث هذا للماء عند $T = 273.16$ K و $P = 6.03 \times 10^{-3}$ atm. تستطيع الأطوار الثلاثة أن توجد في حالة اتزان عند النقطة الثلاثية فقط. ولأنّ هذه النقطة تعود إلى قيمة فريدة لدرجة الحرارة والضغط، فإنّه يمكن إعادة الحصول عليها. وتستعمل عادة كنقطة مرجعية. فمثلا، تحدد درجة الحرارة العيارية عادة وبالضبط عند 273.16 K عند النقطة الثلاثية للماء، وليس عند 273.15 K درجة تجمد الماء عند ضغط 1 atm.

لاحظ أنّ منحنى s-l للماء يميل إلى الأعلى نحو اليسار، وهذا صحيح فقط للمواد التي تتمدّد عند التجمد: عند ضغط أعلى، نحتاج إلى درجة حرارة أقلّ تؤدّي إلى تجميد السائل. أمّا الأكثر شيوعًا، فهو أنّ المادة تنكمش عند التجمد، ويميل منحنى s-l إلى الأعلى نحو اليمين، كما هو مبيّن لثاني أكسيد الكربون (CO_2) في (الشكل 13 - 21).

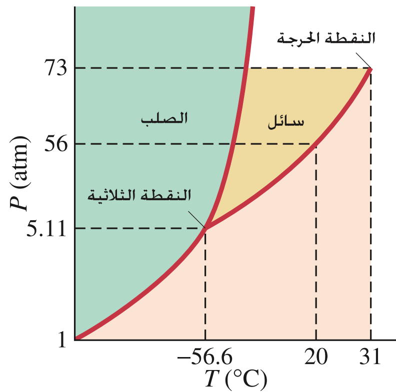
التحولات في الطور التي كنّا نناقشها حتى الآن هي الحالات الشائعة. وعلى أيّ حال، فإنّ بعض المواد قد تتكوّن في أشكالٍ متعدّدة في الحالة الصلبة. إنّ التحوّل من طور إلى آخر يحصل عند درجة حرارة وضغط معينين، تمامًا كما في الأطوار العادية، فمثلا، لوحظ أنّ الجليد يتكون في ثمانية أشكال عند الضغط العالي. وللهيليوم العادي طوران مختلفان في حالة السيولة هما: هيليوم I، وهيليوم II. وهما يتكونان فقط عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق. إنّ هيليوم II له خصائص غير عادية، يقال لها **الميوعة الفائقة**. إنّها في الأساس ذات لزوجةٍ معدومة، ولها خصائص غريبة كصعودها نحو أعلى وعاءٍ مفتوح.



الشكل 13 - 20 مخطط الطور للماء (لاحظ أنّ التدريج ليس خطيًا.)

الدرجة (النقطة) الثلاثية

الشكل 13 - 21 مخطط الطور لثاني أكسيد الكربون.



الميوعة الفائقة.

* 13-13 ضغط البخار والرطوبة

التبخر

إذا تركنا كوبًا من الماء خلال الليل معرضة للجو، فسوف ينقص مستوى الماء فيها حتى الصباح، وهنا نقول إنّ الماء قد تبخر، وهذا يعني أنّ بعضه تحول إلى بخار أو إلى الحالة الغازية.

التبخر

ويمكن تفسير **عملية التبخر** هذه على أساس النظرية الحركية: تمرّ الجزيئات في السائل بجوار بعضها بسرعات متفاوته، تتبع تقريبًا توزيع ماكسويل. هناك قوى تجاذب كبيرة بين هذه الجزيئات التي تحافظ عليها متجاورة وقريبة في طور السائل. وبسبب سرعته، يمكن لجزيء قريب من سطح السائل أن يغادر سطح السائل لحظيًا. ولكن، وكما هو الحال عند قذف حجر إلى الأعلى من سطح الأرض فإنه يعود إليها، فإنّ قوى الجذب للجزيئات الأخرى تستطيع سحب هذا الجزيء المغادر ليعود إلى سطح السائل – هذا إذا كانت سرعته ليست كبيرة. أمّا الجزيء الذي له سرعة عالية وكافية فسيغادر سطح السائل نهائيًا كصاروخ يفلت من الأرض، ويصبح جزءًا من الحالة الغازية. إنّ الجزيئات التي لها طاقة أعلى من حدّ معين فقط هي التي تستطيع الإفلات إلى الحالة الغازية. وقد سبق وأشرنا إلى أنّ نظرية الحركية تبين أنّ عدد الجزيئات النسبي التي لها طاقة حركية أكبر من قيمة معيّنة مثل E_A في (الشكل 13 - 18) يزداد مع درجة الحرارة. وهذا يعزز الملاحظة المألوفة في أنّ معدل التبخر يكون أكبر عند درجات الحرارة العالية.

تطبيق الفيزياء
التبخر بسبب البرودة

وبسبب أنّ الجزيئات الأكبر سرعةً هي التي تنجو من سطح السائل، فإنّ متوسط سرعة الجزيئات المتبقية يكون أقلّ. وعندما يكون متوسط السرعة أقلّ، فإنّ درجة الحرارة المطلقة تكون أقلّ كذلك. وهكذا تستنتج النظرية الحركية أنّ التبخر هو عملية تبريد. إنك بلا شك قد لاحظت هذا الأثر عندما تخرج من حمام ساخن، وتشعر بالبرد عندما يبدأ الماء الذي على جسمك بالتبخّر، وعندما تتعرق نتيجة بذل جهد في يوم حار، فإنّ نسمةً لطيفةً تشعرك بالبرد من خلال التبخّر.

ضغط البخار

يحتوي الهواء عادةً على بخار ماء (ماء في الحالة الغازية)، ويأتي ذلك بصورة رئيسة من التبخّر. وسنتناول هذه العملية بتفصيل أكبر، خذ وعاءً مغلقًا مملوءًا جزئيًّا بالماء (أو سائل آخر) وقد أُزيل منه الهواء كذلك (الشكل 13 - 22). تتبخّر الجزيئات الأكثر سرعةً بسرعةٍ إلى الحيّز فوق سطح السائل. وفي أثناء تجوّلها، يصطدم بعض هذه الجزيئات بسطح السائل، وتصبح جزءًا من السائل مرة أخرى، وهذا هو **التكاثف**. يزداد عدد الجزيئات في البخار حتى يصل إلى مرحلة يكون فيها عدد الجزيئات التي تغادر السائل مساويًا لعدد الجزيئات العائدة إليه في الفترة الزمنية نفسها. وهكذا يتحقق الاتزان، ويسمى الحيز فوق سطح السائل مشبعًا. ويسمى ضغط البخار عندما يكون مشبعًا "ضغط **البخار المشبع**" (أو أحيانًا للسهولة "ضغط البخار").

لا يعتمد ضغط البخار المشبع على حجم الوعاء. إذا قلّلنا الحجم فوق سطح السائل فجأةً، فإنّ كثافة الجزيئات في طور البخار تزداد مؤقتًا. وسوف يزيد عدد الجزيئات التي تصطدم بالسائل في الثانية. وسوف يكون هناك معدّل للجزيئات العائدة إلى السائل حتى تصل إلى الاتزان مرّةً أخرى، وهذا يتحقق عند قيمة ضغط البخار السابقة نفسها ما دامت درجة الحرارة ثابتة لم تتغير.

إنّ ضغط البخار المشبع لأيّ مادة يعتمد على درجة الحرارة. وعند درجات الحرارة العالية، فإنّ كثيرا من الجزيئات يكون لديها طاقة حركية كبيرة للخروج من سطح السائل إلى الحالة الغازية. ضغط البخار المشبع للماء عند درجات حرارة مختلفة مبين في (الجدول 13 - 3).

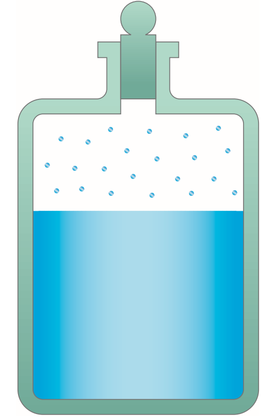
لاحظ أنّه حتى المواد الصلبة – مثلًا الجليد – لها ضغط بخار مشبع يمكن قياسه.

في الحياة اليومية، يتم التبخر من سطح السائل إلى الهواء وليس إلى الفراغ. وهذا لا يغير المناقشة السابقة المتعلقة (بالشكل 13 - 22). سوف نصل إلى اتزان عندما يكون هناك عدد كاف من الجزيئات في طور الغاز بحيث يكون العدد الذي يدخل عائدًا إلى السائل مساويًا العدد الذي يتبخّر. إنّ تركيز جزيئات معيّنة (مثل الماء) في الحالة الغازية لا يتأثر بوجود الهواء، رغم أنّ التصادم مع جزيئات الهواء ربما يزيد من الوقت اللازم للوصول إلى الاتزان. وهكذا يحصل الاتزان عند القيمة نفسها من ضغط البخار المشبع كما لو لم يكن الهواء موجودًا.

إذا كان الوعاء كبيرًا أو مفتوحًا (ليس مغلقًا)، فقد يتبخر السائل كلّه قبل الوصول إلى الاتزان. وإذا لم يكن الوعاء محكمًا – مثل غرفة في بيتك – فلا يحتمل حصول التشبّع ببخار الماء (إلا إذا كانت تمطر في الخارج).

الغليان

يزداد ضغط البخار المشبع بزيادة درجة الحرارة إلى النقطة التي يصبح عندها ضغط البخار المشبع عند تلك الدرجة مساويًا للضغط الخارجي، فيحدث **الغليان** (الشكل 13 – 23). وعند الاقتراب من درجة الغليان، تتشكل فقاعات صغيرة داخل السائل تشير إلى تحوّلٍ من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية.



الشكل 13 – 22 يظهر البخار فوق السائل في وعاء مغلق.

الجدول 13-3
ضغط البخار المشبع للماء

درجة الحرارة (°C)	ضغط البخار المشبع Pa ($= N/m^2$)	torr ($= mm\text{-}Hg$)
– 50	0.030	4.0
– 10	1.95	2.60×10^2
0	4.58	6.11×10^2
5	6.54	8.72×10^2
10	9.21	1.23×10^3
15	12.8	1.71×10^3
20	17.5	2.33×10^3
25	23.8	3.17×10^3
30	31.8	4.24×10^3
40	55.3	7.37×10^3
50	92.5	1.23×10^4
60	149	1.99×10^4
* 70	234	3.12×10^4
80	355	4.73×10^4
90	526	7.01×10^4
**100	760	1.01×10^5
120	1489	1.99×10^5
150	3570	4.76×10^5

* درجة الغليان في اجتماع قمة جبل إفرست.

** درجة الغليان عند مستوى سطح البحر.

وعلى أيّ حال، اذا كان ضغط البخار داخل الفقاعات أقلّ من الضغط الخارجي، فسوف تسحق الفقاعات حالًا. وعند زيادة درجة الحرارة، فإنّ ضغط البخار المشبع داخل الفقاعة يصبح في النهاية مساويًا لضغط الهواء الخارجي أو يزيد عليه، وعندئذٍ لا تنهار الفقاعة، بل قد تصعد نحو السطح، ويكون الغليان قد بدأ. *يغلي السائل عندما يصبح ضغط بخاره المشبع مساويًا للضغط الخارجي*. وهذا ما يحدث في حالة الماء عند ضغط 1 atm (760 torr) وعند 100°C، كما يلاحظ من (الجدول 13 - 3).

عند الغليان، ضغط البخار المشبع يساوي الضغط الخارجي.

تعتمد درجة غليان السائل بصورةٍ واضحةٍ على الضغط الخارجي. عند الارتفاعات العالية، تكون درجة غليان الماء أقلّ من تلك التي عند سطح البحر؛ لأنّ ضغط الهواء أقلّ في الأعلى. فمثلًا، يكون ضغط الهواء عند قمّة جبل إفرست (8850 m) ثلث قيمته عند سطح البحر تقريبًا. ومن (الجدول 13 - 3)، نستطيع رؤية أنّ غليان الماء حوالي 70°C. إنّ طهي الطعام بالغليان يحتاج إلى وقت أطول عند المرتفعات؛ لأنّ درجة الحرارة تكون أقلّ. إلا أنّ أوعية الطبخ بالضغط، تخفض الزمن؛ لأنها ترفع الضغط إلى حوالي 2 atm، وبالتالي تؤدي إلى درجات غليان عالية.



الشكل 13 - 23 الغليان:
فقاعات بخار الماء تطفو نحو الأعلى من القاعدة (حيث درجة الحرارة الأعلى).

الضغط الجزئي والرطوبة

عندما نقول إنّ الطقسَ حارٌّ أو رطبٌ، فإنّنا نعود إلى محتوى بخار الماء في الهواء، والذي يكون مزيجًا من غازات مختلفة. ويكون الضغط الكلي هو مجموع الضغوط الجزئية لكلّ من الغازات الموجودة *. نعني بالضغط الجزئي الضغط الذي يؤثر به كلّ غاز منفردًا. ويكون الضغط الجزئي للماء في الهواء منخفضًا إلى الصفر، ويمكن أن يتغير صعودًا إلى حدٍّ أقصى بحيث يساوي ضغط البخار المشبع للماء عند درجة الحرارة المعطاة.

وهكذا، عند20°C، لا يزيد الضغط الجزئي للماء على 17.5 torr (انظر الجدول 13 – 3). تعرف الرطوبة النسبية كحاصل قسمة الضغط الجزئي لبخار الماء على ضغط البخار المشبع عند درجة حرارةٍ معيّنة. وتُوصف عادةً بصورةٍ مئوية

الرطوبة النسبية

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{الضغط الجزئي } H_2O}{\text{ضغط البخار المشبع لـ } H_2O} \times 100\%$$

وهكذا، عندما تكون الرطوبة النسبية قريبة من 100% يحتفظ الهواء (تقريبًا) ببخار الماء الذي يمكنه استيعابه كلّه.

المثال 13 - 18 الرطوبة النسبية

في يوم حار، درجة الحرارة 30°C، وضغط بخار الماء الجزئي في الهواء يساوي 21.0 torr. ما قيمة الرطوبة النسبية.

النّهج: من (الجدول 13 - 3)، نرى أنّ ضغط البخار المشبع للماء عند 30°C هو 31.8 torr.

الحلّ: وهكذا، فإنّ الرطوبة النسبية هي

$$\frac{21.0\ \text{torr}}{31.8\ \text{torr}} \times 100\% = 66\%$$

تطبيق الفيزياء
الرطوبة والشعور بالراحة.

الإنسان حساس للرطوبة. لذا، فإنّ رطوبة نسبية من 40 إلى 50% عادة تكون مثالية للصحة والشعور بالراحة. والرطوبة العالية، خاصة في الأيام الحارة، تقلّل تبخّر الرطوبة من الجلد، وهي واحدة من العمليات الحيوية الضرورية لتنظيم درجة حرارة الجسم. الرطوبة المتدنّية في المقابل، يمكن أن تجفّف الجلد والأغشية المخاطية.

* مثلا، 78% (من الحجم) من جزيئات الهواء هو نيتروجين، و 21% أكسجين، وبكمية قليلة كثيرا من بخار الماء، والأرغون، وغازات أخرى. عند ضغط هواء 1 atm، يؤثر الأكسجين بضغط جزئي 0.21 atm والنيتروجين 0.78 atm.

تطبيق الفيزياء
الطقس



الشكل 13-24 يستوطن الضباب فوق قرية تقع في منطقة منخفضة حيث انخفضت درجة الحرارة دون نقطة الندى.

يكون الهواء مُشبعًا ببخار الماء عند ما يكون الضغط الجزئي للماء في الهواء مساويًا لضغط البخار المُشبع عند درجة الحرارة تلك. إذا زاد الضغط الجزئي للماء على ضغط البخار المُشبع، فيُقال إنّ الهواء فوق التشبُّع. ويمكن لهذا الوضع أن يحدث عند انخفاض درجة الحرارة. فمثلاً، افرض أنّ درجة الحرارة $30°C$، والضغط الجزئي للماء هو 21 torr، حيث يمثّل رطوبةً نسبيّةً قدرها 66% كما رأينا في (المثال 13-18). والآن، افرض أنّ درجة الحرارة انخفضت إلى $20°C$ مثلا، كما يحدث في الليل. من (الجدول 13 – 3)، نرى أنّ ضغط البخار المشبع عند $20°C$ هو 17.5 torr. ولهذا، تكون الرطوبة النسبية أكثر من 100%، ولا يستطيع الهواء فوق المُتشبّع أن يتحمّل هذا الماء الزائد. قد يتكاثف الماء الزائد ويظهر بصورة ندى، أو ضباب، أو مطر (الشكل 13-24).

عندما يبرد الهواء الذي يحتوي كميّةً معيّنةً من الماء، فسنصل إلى درجة حرارة حيث يساوي الضغط الجزئي للماء ضغط البخار المشبع: وهذا ما يدعى بنقطة الندى. يعدّ قياس درجة الندى أدق أسلوب لتحديد الرطوبة النسبية. أحد الأساليب إلى هذا هو استعمال سطح معدني مصقول ملامس للهواء يبرد تدريجيًا. إنّ درجة الحرارة التي يبدأ عندها ظهور الرطوبة على السطح هي نقطة الندى، ويمكن الحصول عندها على الضغط الجزئي للماء من قوائم ضغط البخار المشبع. فمثلاً، إذا كانت درجة الحرارة $20°C$ في يوم ما، وكانت درجة الندى $5°C$، فإنّ الضغط الجزئي للماء (الجدول 13-3) في الهواء الذي درجته $20°C$ هو 6.54 torr، فيما يكون ضغط البخار المشبع 17.5 torr. ومن هنا، فإنّ الرطوبة النسبية هي $6.54/17.5 = 37\%$.

* 13-14 الانتشار

إذا وضعت نقاطًا قليلةً من الملوّن الغذائي بعناية في وعاء يحتوي كميّةً من الماء كما في (الشكل 13-25)، فسترى أنّ اللون ينتشر خلال الماء. قد يستغرق ذلك عدة ساعات (بفرض أنك لم ترجّ الزجاجة)، ولكن اللون سوف يتجانس أخيرًا. ويعدّ هذا المزج المعروف بالانتشار دليلا آخر على الحركة العشوائية للجزيئات.

كما أنّ الانتشار يحدث كذلك في الغازات. ومن الأمثلة الشائعة على هذا العطور أو الدخان الذي ينتشر في الهواء، إضافة إلى رائحة شيء يطبخ، رغم أنّ تيارات الحمل تؤدي غالبًا دورًا في نشر الروائح ونقلها بدرجة أكثر من الانتشار. يعتمد الانتشار على التركيز، والذي يقصد به عدد الجزيئات، أو عدد المولات لوحدة الحجوم.

يحدث الانتشار من المناطق ذات التركيز الأعلى إلى المناطق ذات التركيز الأقل.

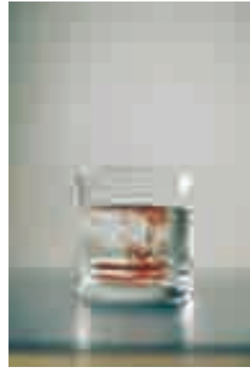
وبشكل عام، تنتقل المادة المنتشرة من المنطقة ذات التركيز الأعلى إلى أخرى ذات التركيز الأقلّ.

يمكن فهم الانتشار أيضًا على أساس النظرية الحركية وحركة الجزيئات العشوائية. خذ أنبوبًا مساحة مقطعه A، ويحتوي جزيئات تركيزها عالٍ في اليسار أكثر منه في اليمين، (الشكل 13-26).

يبين **الشكل 13-25** انتقال نقاط قليلة من الملونات الغذائية ببطء خلال الماء، لتصبح متجانسةً أخيرًا.



(أ)

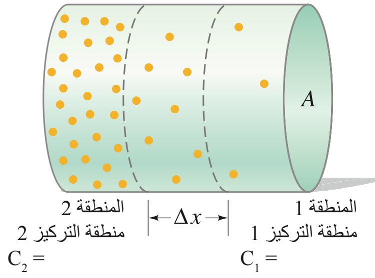


(ب)



(جـ)

نفرض أنّ الجزيئات في حركة عشوائية. وبالتالي سيكون هنالك جريان من الجزيئات نحو اليمين. لِمَ يُعدّ هذا صحيحًا؟ نفترض جزءًا صغيرًا من الأنبوب طوله Δx كما هو مبين. تعبر الجزيئات من المنطقتين 1 و 2 هذه المنطقة المركزية نتيجة هذه الحركة العشوائية. كلّما كانت الجزيئات أكثر في منطقة ما، زاد عدد الجزيئات التي تصدم مساحةً معيّنةً أو تعبر منطقة فاصلة. وبما أنّ تركيز الجزيئات أكثر في المنطقة 1 مقارنةً ما في المنطقة 2، فإنّ جزيئات أكثر تعبر المنطقة الوسطى من المنطقة 1 إلى المنطقة 2. وبهذا يكون هناك تدفق محصل للجزيئات من اليسار إلى اليمين، من التركيز الأعلى إلى التركيز الأقل. ويصبح التدفق المحصل صفرًا عند تساوي التركيزين فقط.



الشكل 13-26 يحدث الانتشار من منطقة عالية التركيز إلى أخرى قليلة التركيز. (فقط نوع واحد من الجزيئات مبين).

وقد تتوقع أنّه كلّما كان الفرق في التركيز أكبر كان معدل الجريان أكبر. وهذا ما يحصل فعلًا، حيث يتناسب معدّل الجريان J (عدد الجزيئات أو المولات أو kg في الثانية)، طرديًّا مع التغيّر في التركيز لكلّ وحدة مسافة، $(C_1 - C_2)/\Delta x$ (يسمى تدرّج التركيز)، وكذلك مع مساحة المقطع A (انظر الشكل 13-26):

معادلة الانتشار

$$J = DA\frac{C_1 - C_2}{\Delta x} \qquad \textbf{(13-10)}$$

D هو ثابت تناسب ويُسَمّى ثابت الانتشار. (المعادلة 13-10) تدعى معادلة الانتشار، أو قانون فيك. إذا أُعطي التركيزان بوحدة mol/m^3، فإنّ J هو عدد المولات التي تمر بنقطة معينة في الثانية. وإذا أعطي التركيزان بـ kg/m^3، فإنّ J هي الكتلة المتحركة في الثانية. في حين تعطى المسافة Δx بالأمتار. قيم D لمواد متنوعة موجودة في (الجدول 13-4).

المثال 13-19 انتشار الأمونيا في الهواء

لنأخذ فكرةً عن الزمن اللازم للانتشار، احسب بالتقريب الوقت اللازم لإيجاد الأمونيا (NH_3) على بعد 10 cm من قنينة بعد فتحها، بفرض أنّ الانتشار هو الموجود فقط.

النّهج: سيكون هذا حسابًا تقريبيًّا. يمكن اعتبار معدل الانتشار J مساويًا لعدد الجزيئات N المنتشرة عبر مساحة A في زمن t: $J = N/t$، حيث عندها $t = N/J$، حيث J كما أُعطيت (بالمعادلة 13-10). سوف نحتاج إلى عمل بعض الفرضيات بشأن التركيزات لاستعمال (المعادلة 13 - 10).

الحلّ: باستعمال (المعادلة 13 - 10)، نجد أنّ

$$t = \frac{N}{J} = \frac{N}{DA}\frac{\Delta x}{\Delta C}$$

متوسط التركيز (في منتصف المسافة بين القنينة والأنف) يمكن تقريبها بـ $\bar{C} \approx N/V$، حيث V هو الحجم الذي تتحرك خلاله الجزيئات والذي يساوي $V \approx A\,\Delta x$، حيث Δx هي 10 cm أي 0.10 m تقريبًا. نعوض $N = \bar{C}V = \bar{C}A\,\Delta x$ في المعادلة السابقة

$$t \approx \frac{(\bar{C}A\,\Delta x)\Delta x}{DA\,\Delta C} = \frac{\bar{C}}{\Delta C}\frac{(\Delta x)^2}{D}$$

إنّ تركيز الأمونيا كبير بالقرب من القنينة، ولكنّه قليل بالقرب من الأنف، لذلك $\bar{C} \approx \Delta C/2$ أو $(\bar{C}/\Delta C) \approx \frac{1}{2}$.

بما أنّ جزيئات الأمونيا NH_3 لها حجم بين H_2 و O_2، لذلك من (الجدول 13 - 4) يمكن تقريب D بـ $D \approx 4 \times 10^{-5}\ m^2/s$. لذا، فإنّ

$$t \approx \frac{1}{2}\frac{(0.10\ m)^2}{(4 \times 10^{-5}\ m^2/s)} \approx 100\ s$$

أو بين دقيقة ودقيقتين.

ملحوظة: يبدو من هذه النتيجة أنّ المدة طويلة مقارنة بالتجربة، وهذا يقترح أنّ التيارات الهوائية (تيارات الحمل) أكثر أهمية من الانتشار في نقل الروائح.

تطبيق الفيزياء
زمن الانتشار

الجدول 13-4 ثابت الانتشار، D (20°C, 1 atm)

الجزيئات المنتشرة	الوسط	D (m²/s)
H_2	هواء	6.3×10^{-5}
O_2	هواء	1.8×10^{-5}
O_2	ماء	100×10^{-11}
الدم	ماء	6.9×10^{-11}
جلايسين حمض أميني	ماء	95×10^{-11}
DNA (كتلة 6×10^6 u)	ماء	0.13×10^{-11}

تطبيق الفيزياء
الانتشار في الأعضاء الحية.

يُعدّ الانتشار مهمًّا جدًّا بين الأعضاء الحيّة. فمثلًا، تنتشر الجزيئات الناتجة من تفاعلاتٍ كيماويةٍ داخل الخلايا إلى مناطق أخرى لتأخذ، دورها في تفاعلاتٍ أخرى.

كما أنّ انتشار الغازات مهمٌّ أيضًا: فالنباتات تحتاج إلى ثاني أكسيد الكربون للتمثيل الكلوروفيلي (الضوئي). ينتشر CO_2 في الأوراق من الهواء الخارجي خلال فتحات صغيرة. وعند استعمال CO_2 في الأوراق، يقل تركيزه عن تركيزه في الهواء الخارجي. لذا، فإنه ينتشر أكثر نحو الداخل في الأوراق. أما بخار الماء والأكسجين الناتج في الأوراق، فينتشر نحو الخارج في الهواء.

كما أنّ الحيوانات تتبادل الأكسجين و CO_2 كذلك مع الجوّ المحيط. الأكسجين ضروريٌّ لتفاعلات إنتاج الطاقة، ويجب أن ينتشر إلى داخل الخلايا. في حين ينتج CO_2 من كثيرٍ من تفاعلات الأيض، ويجب أن ينتشر إلى خارج الخلايا، لكن انتشاره بطيء خلال المسافات الطويلة. ولذلك، فإنّ الأعضاء الصغرى جدّا في عالم الحيوان قد تنجو دون تطوير أنظمة معقدة للتنفس والدورة الدموية. وفي الإنسان، يؤخذ الأكسجين إلى الرئتين، حيث ينتشر إلى مسافات صغيرة عبر أنسجة الرئتين وللدم. ثم ينقله الدم إلى الخلايا في أنحاء الجسم. كذلك يحمل الدم CO_2 الناتج من الخلايا عائدًا إلى الرئتين، حيث ينتشر إلى الخارج.

ملخص

تتنبّأ النظريّة الذريّة للمادة بأنّ المادة مكوّنةٌ من وحداتٍ دقيقةٍ تُسَمّى ذرات، ويبلغ قطرها حوالي 10^{-10} m. كتل الذرات والجزيئات محددة على تدريج حيث يختار الكربون العادي (^{12}C) ويُعطى القيمة 12.0000 u (وحدة كتلة ذريّة).

يُعزى التمييز بين الأجسام الصلبة والسائلة والغازيّة إلى متانة قوى التجاذب بيّن الذرات أو الجزيئات وسرعتها المتوسطة.

درجة الحرارة هي مقياس لمدى سخونة الجسم أو برودته. تستعمل موازين الحرارة لقياس درجة الحرارة على مقاييس سيلزيوس (°C)، أو فهرنهايت، (°F) أو كلفن (K).

هناك نقطتان عياريتان على كلّ تدريج هما: درجة تجمد الماء (0°C, 32°F, 273.15 K). ودرجة غليانه،(100°C, 212°F, 373.15K). تغير وحدة على مقياس المطلق (كلفن) يساوي درجة واحدة على سيلزيوس أو $\frac{9}{5}$ درجة فهرنهايت. ترتبط الدرجات المطلقة بالسيلزيوس (°C) بـ

$$T\,(\mathrm{K}) = T\,(^{\circ}\mathrm{C}) + 273.15$$

يتناسب التغير في الطول، ΔL، لمادة صلبة عندما تتغير درجة حرارة بمقدار ΔT طرديًا مع تغير الحرارة والطول الأصلي L_0. أي

$$\Delta L = \alpha L_0\,\Delta T \qquad \textbf{(1– 13أ)}$$

حيث α معامل التمدد الطولي.

يتناسب التغير في الحجم لمعظم المواد الصلبة، السائلة والغازية مع التغير في درجة الحرارة والحجم الأصلي V_0:

$$\Delta V = \beta V_0\,\Delta T \qquad \textbf{(2–13)}$$

معامل التمدد الحجمي، β، يساوي 3α تقريبًا للمواد الصلبة المتجانسة. الماء غير عادي لأنّه، وبخلاف معظم المواد التي يزيد حجمها بزيادة درجة الحرارة، فإنّ حجمه يقل في الواقع عند زيادة درجة الحرارة في المدى 0°C إلى 4°C.

قانون الغاز المثالي، أو معادلة الحالة للغاز المثالي تربط الضغط P، الحجم V ودرجة الحرارة T (بالكلفن) لعدد مولات n بـ:

$$PV = nRT \qquad \textbf{(3 – 13)}$$

حيث $R = 8.314\ \mathrm{J/mol\cdot K}$ للغازات جميعها. تتبع الغازات الحقيقية قانون الغاز المثالي بدقة إذا لم تكن تحت ضغط كبير، أو قريبة من درجة الإسالة.

يعرف المول الواحد من المادة بأنه عدد الغرامات الذي يساوي الكتلة الذرية أو الجزيئية عدديًّا.

عدد أفوجادرو، $N_A = 6.02 \times 10^{23}$، هو عدد الذرات أو الجزيئات في مول واحد لأيّ مادة نقية.

يمكن كتابة قانون الغاز المثالي بدلالة عدد الجزيئات N في الغاز.

$$PV = NkT \qquad \textbf{(4 – 13)}$$

حيث $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K}$ هو ثابت بولتزمان.

بحسب النظرية الحركية للغازات، والتي تبنى على فكرة أنّ الغاز مكوّنٌ من جزيئات تتحرّك بسرعةٍ وبصورةٍ عشوائيّة، فإنّ الطاقة الحركيّة المتوسطة للجزيئات تتناسب مع درجة الحرارة T بالكلفن:

$$\overline{\mathrm{KE}} = \tfrac{1}{2}m\overline{v^2} = \tfrac{3}{2}kT \qquad \textbf{(8 – 13)}$$

حيث k ثابت بولتزمان. عند أيّ لحظة هناك توزيع واسع لسرعات الجزيئات لغاز ما.

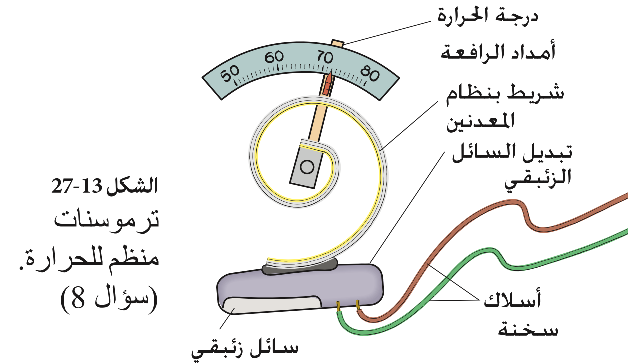
[*يختلف تصرف الغازات عند الضغط العالي أو قرب درجة الإسالة عن الغاز المثالي؛ نظرًا لحجم الجزيئات وقوى التجاذب بينها. تحت درجة الحرارة الحرجة، يتحول الغاز إلى سائل إذا تعرض لضغط كاف، ولكن إذا كانت درجة الحرارة أعلى من الدرجة الحرجة، فليس هناك مقدار من الضغط يمكن أن يشكل سطح السائل. النقطة الثلاثية لمادة ما هي درجة الحرارة المنفردة والضغط التي تكون عندها الحالات كلّها للمادة – الصلبة، الغازية والسائلة – حالة اتزان.]

[* تبخّر السائل هو نتيجة الجزيئات السريعة التي تنجو من السطح. ويرجع ضغط البخار المشبع إلى ضغط البخار فوق سائل عندما يكون الطوران في حالة اتزان. إنّ ضغط البخار لمادة ما عند درجة غليانها يساوي الضغط الجوي. **الرطوبة النسبية** للهواء في مكان معيّن هو النسبة بين الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء إلى ضغط البخار المشبع عند درجة الحرارة تلك؛ ويعبر عنها بصورة نسبة مئوية.]

[* الانتشار عملية تتحرك فيها الجزيئات من منطقة إلى أخرى بسبب الاختلاف في التركيز.]

أسئلــة

1. أيّهما يحوي ذرات أكثر: 1 kg من الحديد، أم 1 kg من الألمنيوم؟ انظر الجدول الدوري أو الملحق B.
2. اذكر خصائص متعدّدة للمواد التي تُسْتَغَلُّ لعمل ميزان حرارة.
3. أيّهما أكبر $1C^o$ أم $1F^o$؟
*4. إذا كان النظام A في حالة اتزان مع النظام B، ولكن B ليس في حالة اتزان حراري مع النظام C، فماذا يمكن أن تقول عن درجات الحرارة للأنظمة A، وB، وC؟
5. شريحة منبسطة مزدوجة الفلز تتكوّن من ألمنيوم مثبتة إلى شريحة من الحديد. وعند تسخينها ستنثني. أيّ الفلزين سيكون من الجهة الخارجية للمنحنى؟ [مساعدة: انظر الجدول 13 - 1]. لماذا؟
6. في العلاقة $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$، هل ستكون L_0 الطول الأصلي، الطول النهائي، أو أي طول غير مهم؟ فسّر.
7. وحدات معامل التمدد الحراري α هي $(^oC)^{-1}$ وليس هناك ذكرٌ لأيّ وحدة طول مثل المتر. هل سيختلف معامل التمدّد لو استخدمنا القدم، والملميتر بدلًا من المتر؟ فسّر.
8. يبيّن (الشكل 13 – 27) رسمًا لمنظّم حرارةٍ بسيطٍ يُستعمل للتحكّم بفرن (أو أي نظام تسخين أو تبريد). يتكوّن المزدوج الحراريُّ من شريحتين من فلزين مختلفين يُربطان معًا. يتكوّن المفتاح الكهربائيُّ من وعاءٍ زجاجيٍّ يحتوي الزئبق السائل الذي يصل الكهرباء عندما تستطيع الجريان لتلمس سلكي التماس. فسّر كيف تعمل هذه الأداة على التحكم بالفرن، وكيف يمكن وضعه عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل 13-27 ترموسنات منظم للحرارة. (سؤال 8)

9. أنابيب البخار الطويلة المثبتة عند النهاية غالبًا ما يكون لها جزء بصورة حرف U. لماذا؟
10. أسطوانة منبسطة منتظمة من الرصاص تطفو في الزئبق عند 0^oC. هل سيطفو الرصاص مرتفعًا عند زيادة درجة الحرارة أم منخفضًا ؟ فسّر.
11. عندما يُوضع ميزانُ حرارة زئبقيٍّ باردٍ أولًا في ماءٍ ساخن، ينخفض مستوى الزئبق أولًا ثم يرتفع، علّل ذلك.
12. قد ينكسر وعاء زجاجي إذا سخّنّا أو برّدنا جزءًا منه أسرع من الأجزاء المجاورة. علّل ذلك.
13. المبدأ الأساس في زجاج البايركس أنّ معامل تمدده أصغر من ذلك الذي للزجاج العادي (الجدول 13-1). فسّر كيف يؤدي ذلك إلى زيادة مقاومة البايركس للحرارة.
14. ساعة جدّك دقيقة عند درجة 20^oC. هل ستسير أسرع في يوم حار (30^oC) أم أبطأ؟ فسّر. تستخدم الساعة بندولا مثبتا في قضيب من النحاس الأصفر نحيف وطويل.
15. يسبّبُ تجميد علبةٍ من الصودا انتفاخ قاعدتها والجزء العلوي منها لدرجة أنّ العلبة لا تستقرّ على قاعدتها. ما الذي حصل؟
16. عندما يضغط غاز بسرعة (مثلا باستعمال مكبس)، تزداد درجة حرارته. وعندما يتمدد غاز ضد مكبس فإنه يبرد. فسر هذه التغيرات في درجة الحرارة باستعمال نظرية الحركة، مع ملاحظة (بشكل خاص) ما يحدث لزخم الجزيئات عندما تصطدم بالمكبس المتحرك.
17. هل ستزداد قوّة الطفو على كرة من الألمنيوم مغمورة في الماء إذا زادت درجة حرارتها من 20^oC إلى 40^oC أم ستنقص؟ فسّر.
18. فسّر بالكلمات كيف ينتج قانون شارل من نظرية الحركة والعلاقة بين الطاقة الحركية المتوسطة ودرجة الحرارة المطلقة.
19. فسّر بالكلمات كيف ينتج قانون جاي – لوساك من نظرية الحركة.
20. عندما تصعد عاليًا في الغلاف الجويِّ الأرضي، فإنّ معدّل N_2 إلى O_2 من الجزيئات يزداد، لماذا؟
*21. سرعة الإفلات من الأرض تعود إلى أقلّ سرعةٍ يجب على أيّ جسمٍ أن يملكها للخروج من الأرض وعدم العودة أبدًا. سرعة الإفلات من القمر حوالي خمس سرعة الإفلات من الأرض بسبب صغر كتلة القمر. فسّر سبب عدم امتلاك القمر (عمليًّا) غلافًا جويًّا؟
*22. تبخّر الكحول أسرع من تبخّر الماء عند درجة حرارة الغرفة. ماذا تستنتج حول الخصائص الجزيئية لأحدهما نسبةً إلى الآخر.
*23. فسّر لماذا يكون الجوُّ الحارُّ الرطبُ مزعجًا، وغير مريح أكثر من الجوّ في يومٍ حارٍّ جافٍّ عند درجة الحرارة نفسها؟
*24. هل يمكن أن نغلي الماء عند درجة حرارة الغرفة (20^oC) دون تسخين؟ فسّر ذلك.
*25. افترض يومين تكون درجتا الحرارة فيهما متساويتين، ولكن الرطوبة مختلفة. أيّهما أكثر كثافة عند درجة الحرارة T نفسها؛ الهواء الجاف أم الهواء الرطب؟ فسّر.
*26. فسّر لماذا يكون من الخطورة فتح غطاء المبرّد (الردياتر) لمحرك سيارة حار جدّا؟
*27. لماذا يبدو هواء الزفير كغيمةٍ بيضاءَ قليلًا في الشتاء (الشكل 13 – 28)؟



الشكل 13-28 (المسألة 27).

مسائل

13-1 النظرية الذرية

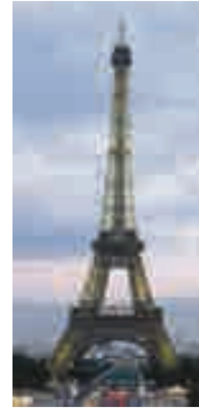
1. (I) كم ذرّةً موجودةً في بنس من النحاس كتلته 3.4-g؟
2. (I) كيف نقارن عدد الذرات في خاتم كتلته 26.5-g من الذهب مع عدد الذرات في خاتم فضة له الكتلة نفسها؟

13-2 درجة الحرارة وموازين الحرارة

3. (I) (أ) "درجة حرارة الغرفة" تُؤخذ عادة 68°F. ما درجة الحرارة هذه على مقياس سيلزيوس؟ (ب) درجة الفتيل في مصباح كهربائي حوالي 1800°C. ما درجة الحرارة هذه على مقياس فهرنهايت؟
4. (I) بيّن أعلى وأقلّ درجات الحرارة التي سُجّلَت، كانت 136°F في الصحراء الليبية و 129°F– في انتاركتكا. ما درجات الحرارة هذه على مقياس سيلزيوس؟
5. (I) (أ) 15°C تحت الصفر، ما درجة الحرارة هذه على مقياس فهرنهايت؟ (ب) 15°C تحت الصفر ما هذه الدرجة بالسيلزيوس؟
6. (II) في ميزان حرارة كحولي، طول عمود الكحول 11.82 cm عند درجة حرارة 0.0C° ويكون طول 22.85 cm عند 100.0°C. ما درجة الحرارة إذا كان طول عمود الكحول (أ) 16.7 cm؟ (ب) 20.50 cm؟

13-4 التمدد الحراري

7. (I) طريق سريع من الإسمنت، بُني بِقِطَع، طولُ كلٍّ منها 12 m (20°C). ما عرض أخاديد التمدد بين القِطَع عند 20°C بحيث تمنع التقوس إذا كان مدى درجات الحرارة من 30°C- إلى 50°C+؟
8. (I) الأنفار سبيكة من الحديد والنيكل، وهي مادة قويّة بمعامل تمدّد طوليٍّ صغير. $[0.2\times10^{-6}\ (C°)^{-1}]$. سطح طاولة طوله 2.0-m مصنوع من هذه المادة ويستخدم لأقيسةٍ دقيقةٍ بالليزر حيث نحتاج إلى دقّة عالية جدًّا. ما مقدار تمدد هذه الطاولة من حيث الطول إذا زادت درجة الحرارة 5.0°C؟ قارن ذلك مع سطح طاولة من الفولاذ.
9. (I) برج إيفل مبنيٌّ من الحديد بارتفاع 300 m تقريبًا. (الشكل 13-29). احسب بالتقريب كم يتغير طوله بين يوليو (درجة الحرارة حوالي 25°C) وكانون الثاني (متوسط درجة الحرارة 2°C). أهمل الزوايا في الأعمدة الحديدية وافترض البرج عمودًا رأسيًّا.



الشكل 13-29
(المسألة 9)
برج إيفل في باريس

10. (II) لعمل مواءمة صحيحة؛ تكون مسامير البرشام المستعملة أكبر من فتحة المسمار حيث يبرد المسمار (عادةً باستعمال الجليد الجاف) قبل وضعه في الفتحة. مسمار فولاذ قطره 1.871 cm يُراد وضعه في فتحة 1.869 cm من حيث القطر عند 20°C. إلى أيّ درجة يجب تبريد المسمار إذا أريد إدخاله في الفتحة؟
11. (II) كثافة الماء عند 4°C هي $1.00\times10^3\ kg/m^3$، فما كثافة الماء عند 94°C؟
12. (II) كرة من الكوارتز قطرها 8.75 cm ماذا سيكون التغير في حجمها إذا سخنت من 30°C إلى 200°C؟
13. (II) مُلئت قارورةٌ من الزجاج حتى الحافة بـ 350.0 mL ماء عند 100.0°C. إذا خفضنا درجة الحرارة إلى 20.0°C، فكم من الماء يمكننا إضافته للقارورة.
14. (II) لوحظ أنّ 55.50 mL ماء عند 20°C تملأ بصورة كاملة الوعاء. عند تسخين الوعاء والماء إلى 60°C فقدنا 0.35 g من الماء. (أ) ما معامل التمدد الحجمي للوعاء؟ (ب) ما المادة الأكثر احتمالًا أن يكون الوعاء مصنوعًا منها إذا علمت أنّ كثافة الماء عند 60°C هي 0.98324 g/mL.
15. (II) (أ) سدادةٌ من النحاس الأصفر يُراد وضعُها في حلقةٍ من الحديد. عند 20°C قطر السدادة 8.753 cm والقطر الداخلي للحلقة 8.743 cm. إلى أيّ درجة حرارة مشتركة يجب تسخينهما بحيث يتواءما؟ (ب) ماذا سيحدث لو كانت السدادة من الحديد والحلقة من النحاس الأصفر؟
16. (II) إذا وضعنا سائلًا في وعاءٍ طويلٍ ضيّق، بحيث يمكن أن يتمدّد باتجاهٍ واحدٍ فقط. بيّن أنّ معامل التمدد الطولي α يساوي معامل التمدد الحجمي β تقريبًا؟
17. (II) (أ) بيّن أنّ التغيّر في الكثافة ρ لمادة ما، عندما تتغيّر درجة الحرارة ΔT يعطى بـ $\Delta\rho = -\beta\rho\ \Delta T$. (ب) ما التغيّر النسبيُّ في الكثافة لكرةٍ رصاصيّةٍ تقلُّ درجة حرارتها من 25°C إلى 40°C-؟
18. (II) صفيحة منتظمة مستطيلة طولها l وعرضها w، ومعامل تمددها الطولي α. بيّن أنه إذا أهملنا الكميات الصغيرة جدًّا، فإنّ التغير في المساحة للصفيحة مع تغير في درجة الحرارة ΔT هو $\Delta A = 2\alpha lw\ \Delta T$. انظر (الشكل 13-30).



الشكل 13-30 (المسألة 18)
تسخين صفيحة مستطيلة

19. (III) بيّن أنه لجسم صلب متجانس، $\beta = 3\alpha$ إذا كان مقدار التمدد قليلًا. β و α هما معاملا التمدد الحجمي والطولي على الترتيب. [مساعدة: افترض جسمًا صلبًا مكعبًا، واهمل الكميات الصغيرة جدًّا. انظر أيضًا المسألة 18 الشكل 13-30]
20. (III) البندول في ساعات الأجداد القديمة مصنوع من النحاس الأصفر، ويكون التوقيت دقيقًا عند درجة حرارة 17°C. كم من الوقت نكسب أو نفقد خلال سنة إذا حفظنا الساعة عند 25°C؟ (افرض أنّ التردد يعتمد على الطول كما في البندول البسيط].
21. (III) (أ) أنبوب ميزان حرارة زئبقي قطره الداخلي 0.140 mm، وحجم المستودع 0.255 cm³. إلى أي مدى سوف يتحرك خيط الزئبق عندما تتغير الحرارة من 11.5°C إلى 33.0°C؟ خذ بالحسبان تمدد زجاج البايركس. (ب) اشتقّ صيغة لتغير طول خليط الزئبق بدلالة الكميات المعقولة. أهمل الحجم مقارنة بحجم المستودع.
22. (III) عجلة أسطوانية مصمتة من الألمنيوم كتلتها 23.4-kg ونصف قطرها 0.41 m، تدور حول محورها عديم الاحتكاك بسرعة زاوية $\omega = 32.8\ rad/s$. إذا رفعنا درجة حرارتها من 20.0°C إلى 75.0°C، فما التغير النسبي في ω؟

13–5* الإجهاد الحراري

23.* (II) قضيبٌ من الألمنيوم طوله مناسبٌ عند درجة 15°C. ما مقدار الإجهاد اللازم للمحافظة على طوله هذا ثابتًا إذا زادت درجة حرارته إلى 35°C؟

24.* (II) (أ) ذراع أفقي من الفولاذ مساحة مقطعه $0.041\ m^2$ مثبت بقوّة مع جسرين فولاذيين عموديين. إذا تم تثبيت الذراع عند درجة 30°C، ما الإجهاد الذي سينشأ في الذراع إذا نقصت درجة حرارته إلى −30°C؟ (ب) هل تجاوزنا قدرة الفولاذ النهائية؟ (جـ) ما الإجهاد الناشئ لو كان الذراع من الأسمنت ومساحة مقطعه $0.13\ m^2$؟ هل سيتشوّه؟

25.* (III) برميل قطره 134.122 cm عند 20°C، ويراد تطويقه بحزام من الحديد. القطر الداخلي للحزام الدائري 134.110 cm عند 20°C. وعرض الحزام 7.4cm، وسمكه 0.65 cm. (أ) إلى أيّ درجة حرارة يجب تسخين الحزام ليطوق البرميل؟ (ب) ماذا سيكون الشد في الحزام عندما يبرد إلى 20°C؟

13-6 قوانين الغازات؛ درجة الحرارة المطلقة

26. (I) ما درجات الحرارة التالية على التدريج المطلق (كلفن): (أ) 86°C؟ (ب) 78°F؟ (جـ) −100°C ؟ (د) 5500°C (هـ) −459°F؟

27. (I). ما هي درجة الصفر المطلق على المقياس الفهرنهايتي؟

28. (II) درجات الحرارة النموذجية في باطن الأرض والشمس هي حوالي4000°C و 15×10^6 °C على الترتيب. (أ) ما درجات الحرارة هذه بالكلفن؟ (ب) ما النسبة المئوية للخطأ في كل حالة إذا نسي الشخص تحويلها من °C إلى K؟

13 – 7 و 13 – 8 قانون الغاز المثالي

29. (I) $3.00\ m^3$ من غاز في الظروف المعياريّة STP وُضِعَتْ تحت ضغط 32.0 atm، فارتفعت درجة حرارتها إلى 38.0°C. فما الحجم؟

30. (I) في محرك الاحتراق الداخلي، يضغط الهواء الذي ضغطه يساوي الضغط الجوي وحرارته 20°C في الأسطوانة بواسطة المكبس إلى $\frac{1}{9}$ حجمه الأصلي (نسبة الضغط = 9.0). احسب، بالتقريب، درجة حرارة الهواء المضغوط بفرض أنّ الضغط يصل إلى 40 atm.

31. (II) احسب كثافة الأكسجين عند STP مستعملا قانون الغاز المثالي.

32. (II) يحتوي خزان على 21.6 kg من (N_2) عند ضغطٍ كلّيٍّ 3.65 atm. ماذا سيكون الضغط لو تمّ استبدال (N_2) بالكتلة نفسها من غاز CO_2؟

33. (II) يحتوي خزّانٌ على 18.5 kg(N_2) عند ظروف STP. (أ) ما حجم الخزّان؟(ب) ماذا سيكون الضغط لو أضفنا 15.0 kg نيتروجين دون تغيير درجة الحرارة؟

34. (II) 18.75 kg مول من غاز الهيليوم عند 10.0°C وضغط مَقيس 0.350 atm. احسب: (أ) حجم غاز الهيليوم تحت هذه الظروف. (ب) درجة حرارته إذا ضُغط إلى نصف الحجم وضغط مَقيس 1.00 atm.

35. (II) ما الضغط داخل خزّانٍ حجمه 35.0-L ويحتوي على 105.0 kg من غاز الأرغونَ عند385 K؟

36. (II) يحتوي خزّانٌ على 26.0 kg إلى (O_2) غاز عند ضغط مقيس مقداره 8.70 atm. إذا استعملنا الهيليوم بدلا من الأكسجين، ما عدد الكيلوغرامات اللازمة من الهيليوم للحصول على ضغط مَقيس مقداره 7.00 atm؟

37. (II) يحقّق بالون هواءٍ ساخن قوَّةَ الطفوِّ لرفعه بواسطة تسخين الهواء داخله، بحيث تصبح كثافته في الداخل أقلّ منها في الخارج. افرض أنّ حجمه كان$1800\ m^3$، والقوّة اللازمة لرفعه 2700 N (تقريب لوزن الركاب والأدوات). احسب درجة الحرارة داخل البالون، بحيث تؤدّي الرفع اللازم. افرض أنّ درجة الحرارة في الخارج 0°C، وأنّ الغاز مثالي تحت هذه الظروف. ما العوامل التي تحدد أقصى ارتفاع يمكن تحقيقه بهذه الطريقة لحمل معين؟ (أهمل العوامل مثل الرياح).

38. (II) تمّ ملء إطار سيارة بالهواء عند درجة 15°C إلى ضغط مقيس 220 kPa. إذا وصلت درجة حرارة الإطار إلى 38°C، فما نسبة الهواء الأصلي التي يجب التخلص منها إذا رغبنا في الإبقاء على الضغط الأصلي 220 kPa؟

39. (II) 61.5 L من الأكسجين عند 18.0°C وضغط كلي 2.45 atm تم ضغطها إلى 48.8 L، وفي الوقت نفسه تم رفع درجة الحرارة إلى 50.0°C، فماذا سيكون الضغط الجديد؟

40. (II) بالون مملوء بالهيليوم أفلت من يد طفل عند مستوى سطح البحر، ودرجة 20.0°C. عندما وصل إلى ارتفاع 3000 m حيث درجة الحرارة 5.0°C والضغط 0.70 atm فقط، فما حجمه بالمقارنة مع حجمه عند سطح البحر؟

13 – 9 قانون الغاز المثالي بدلالة الجزيئات؛ عدد أفوجادرو

41. (I) احسب عدد الجزيئات في غاز مثالي عند الظروف المعيارية STP.

42. (I) ما عدد مولات الماء في اللتر؟ وكم عدد الجزيئات؟

43. احسب بالتقريب عدد (أ) المولات. (ب) الجزيئات للماء في محيطات الكرة الأرضية كلها. افرض أنّ الماء يغطي 75% من الأرض بعمق متوسط 3 km.

44. (II) صندوق مكعب الشكل حجمه $5.1 \times 10^{-2}\ m^3$ يُملأ بالهواء عند الضغط الجوي ودرجة 20°C. يغلق الصندوق ويسخن إلى 180°C. ما مقدار القوّة المحصلة على كلّ جانب من الصندوق؟

45. (III) احسب عدد جزيئات الهواء في كلّ شهيق حجمه 2.0 L وهو عدد الجزيئات التي أخذها غاليلو آخر مرة. [مساعدة: افرض أنّ الجو على ارتفاع 10 km وكثافته ثابتة].

13 – 10 التفسير الجزيئي لدرجة الحرارة

46. (I) (أ) ما الطاقة الحركية المتوسطة لجزيء أكسجين عند STP؟ (ب) ما الطاقة الحركية الانتقالية لـ 2.0 mol من O_2 عند 20°C؟

47. (I) احسب جذر متوسط مربع السرعة rms لذرات الهيليوم بالقرب من سطح الشمس عند درجة حرارة حوالي 6000 K؟

48. (I) بأيّ نسبة سوف تزداد rms لسرعة جزيئات إذا زادت درجة الحرارة من 0°C إلى 100°C.

49. (I) غاز درجة حرارته 20°C. إلى أيّ درجة حرارة يجب رفعه لمضاعفة قيمة rms لسرعة جزيئاته؟

50. (I) اثنا عشر جزيئًا لها السرعات التالية بـ km/s : 6، 2، 4، 6، 0، 4، 1، 8، 5، 3، 7، 8. احسب rms للسرعة.

51. (II) يُراد زيادة rms للسرعة لجزيئات غاز عند 20.0°C بنسبة 1.0%. لأيّ درجة حرارة يجب تسخينه؟

52. (II) إذا ضاعفنا ضغط غاز مع بقاء حجه ثابتًا. ما نسبة تغيّر v_{rms}؟

53. (II) اثبت أنّ قيمة rms لسرعة الجزيئات في غاز يعطى بالعلاقة $v_{rms} = \sqrt{3P/\rho}$ حيث P الضغط في الغاز، و ρ كثافته.

54. (II) أثبت أنه في مزيج من غازين عند درجة الحرارة نفسها، النسبة بين جذر متوسط المربع rms للسرعتين تساوي مقلوب النسبة للجذر التربيعي لكتلتيهما الجزيئيتين.

55. (II) ما هي rms لسرعة جزيئات النيتروجين حجمها 8.5-m^3 عند 2.1 atm إذا كان المقدار الكلي للنيتروجين يساوي 1300 mol؟

56. (II) (أ) احسب rms سرعة لجزيء أكسجين عند 0°C. (ب) حدد كم مرة في الثانية يتحرك ذهابًا وإيابًا عبر غرفة 7.0-m في المتوسط، بفرض أنّ تصادماته مع الجزيئات الأخرى مهملة.

57. (II) ما المسافة المتوسطة بين جزيئات النيتروجين عند الظروف المعيارية STP؟

58. (II) (أ) احسب بالتقريب السرعة rms لحامض أميني كتلته الجزيئية تساوي 89 u في خلية حية عند 37°C. (ب) ماذا ستكون سرعة rms لبروتين كتلته الجزيئية 50,000 u عند 37°C؟

59. (II) برهن أنّ ضغط الغاز P يمكن كتابته على صورة $P = \frac{1}{3}\rho v^2$، حيث ρ هي كثافة الغاز، و v هي سرعة rms للجزيئات.

60. (III) يمكن فصل نظيري اليورانيوم ^{235}U و ^{238}U (يشير الرقم العلوي إلى الكتلة الذرية) بواسطة عملية طرد مركزي للغاز بتركيبهما مع الفلور للحصول على UF_6. احسب سرعة rms لهذه الجزيئات للنظيرين عند درجة حرارة T.

*13 – 12 الغازات الحقيقية؛ تحولات الطور

*61. (I) (أ) عند الضغط الجوي، ما الأطوار التي يمكن لـ CO_2 أن يكون فيها؟ (ب) لأيّ مدًى من الضغط ودرجات الحرارة يكون CO_2 سائلًا؟ ارجع إلى (الشكل 13 – 21).

*62. (I) ما الطور الذي سيكون عليه الماء عندما يكون الضغط 0.01 atm ودرجة الحرارة (أ) 90°C؟ (ب) -20°C؟

*13 – 13 ضغط البخار؛ الرطوبة

*63. (I) ما هي نقطة الندى (تقريبًا) إذا كانت الرطوبة 50% في يوم درجة الحرارة فيه 25°C؟

*64. (I) احسب الضغط الجوي في مكان حيث يغلي الماء عند 90°C؟

*65. (I) إذا كان ضغط الهواء الجوي في مكان جبلي 0.72 atm، احسب درجة الحرارة التي يغلي عندها الماء.

*66. (I) ما درجة الحرارة في يوم عندما يكون الضغط الجزئي للماء 530 Pa، والرطوبة النسبية 40%؟

*67. (I) ما الضغط الجزئي للماء في يوم درجة الحرارة فيه 25°C، والرطوبة النسبية 35%؟

*68. (I) ما الضغط بالتقريب داخل وعاء ضغط إذا كان الماء يغلي عند درجة 120°C؟ افرض عدم ضييع ماء خلال عملية التسخين التي بدأت عند 20°C.

*69. (II) إذا كانت الرطوبة في غرفة حجمها $680\ m^3$ عند درجة 25°C تساوي 80%، ما كتلة الماء التي تستطيع أن تتبخر من مقلاة مفتوحة؟

*70. (III) يُسْحَبُ هواء عند نقطة الندى 5°C إلى مبنى حيث يسخن إلى 25°C. ماذا ستكون الرطوبة النسبية عند هذه الدرجة؟ افرض ضغطًا ثابتًا 1.0 atm. خذ بالحسبان تمدّدَ الهواء.

*13 – 14 الانتشار

*71. (II) احسب الزمن اللازم لجزيء جلايسين (انظر الجدول 13 – 4) كي ينتشر 15 μm في الماء عند 20°C إذا كان تركيزه سيتغيّر من $1.00\ mol/m^3$ إلى $0.40\ mol/m^3$. قارن هذه السرعة بسرعة rms للجزيء. الكتلة الجزيئية 75 u.

*72. (II) ينتشر الأكسجين من سطح الحشرات إلى داخلها خلال أنابيب دقيقة تُسَمّى قصبات هوائية. بالمتوسط، كلّ قصبة طولها 2 mm ومساحة مقطعها $2 \times 10^{-9}\ m^2$. افرض أنّ تركيز الأكسجين في الداخل يساوي نصف تركيزه في الخارج. (أ) برهن أنّ تركيز الأكسجين في الهواء (21% أكسجين) عند 20°C حوالي $8.7\ mol/m^3$. (ب) احسب معدل الانتشار J. (جـ) خمّن الزمن المتوسط لجزيء كي ينتشر إلى الداخل. افرض أنّ ثابت الانتشار يساوي $1 \times 10^{-5}\ m^2/s$.

مسائل عامة

73. تمّ تدريج شريط قياس دقيق من الفولاذ عند 20°C. عند 34°C (أ) هل سيقيس أكثر أم أقلّ؟ (ب) ماذا سيكون الخطأ المئوي؟

74. كوب قياس من البايركس تم تدريجها عند درجة حرارة الغرفة. ماذا سيكون الخطأ في وصفة تتطلب 300 mL من الماء البارد إذا كان الماء والكوب عند درجة 80°C بدل 20°C؟ اهمل تمدد الزجاج.

75. الضغط المَقيس في أنبوب غاز هيليوم 28 atm. بعد أن تمّ تعبئة كثير من البالونات، انخفض الضغط المقيس إلى 5 atm. فما نسبة الغاز المتبقي داخل الأنبوبة؟

76. قـدّر عـدد جـزيـئـات الـهـواء فـي غـرفـة أبـعـادهـا $6.5m \times 3.1\ m \times 2.5m$. افرض أنّ درجة الحرارة هي 22°C ماذا يقابل ذلك بالمول؟

77. كثافة المادة في الفضاء الخارجي حوالي ذرة واحدة لكلّ cm^3، غالبًا من الهيدروجين، ودرجة الحرارة حوالي 2.7 K. احسب سرعة rms لذرات الهيدروجين هذه والضغط (بـ atm).

78. أقل ضغط يمكن الوصول إليه باستعمال أحدث مفرغات الهواء هو $10^{-12}\ N/m^2$. عند مثل هذا الضغط، كم جزيئا يبقى لكلّ cm^3 عند 0°C؟

79. غطّاسٌ يملأ رئتيه بصورةٍ كاملة 5.5 L عندما يكون على عمق 10 m تحت السطح، إلى أيّ حجم سوف تتمدّد رئتاه إذا ارتفع فجأة إلى السطح؟ هل يُنصح بذلك؟

80. تدخل مركبةُ فضاءٍ عائدةٍ من القمر الغلافَ الجويَّ للأرض بسرعة 40,000 km/h. فأيّ درجة حرارة تقابل الجزيئات (افرض النيتروجين) التي تصطدم بمقدمة المركبة عند هذه السرعة ؟ (بسبب درجة الحرارة العالية هذه، يجب أن تُصنع مقدمة المركبة من مواد خاصة، في الواقع جزء منها يتبخر وهذا يبدو كوهج لامع عند الدخول).

81. درجة حرارة غاز مثالي زادت من 110°C إلى 360°C في حين يبقى الحجم وعدد المولات ثابتًا. بأيّ نسبة تغير الضغط؟ وبأيّ نسبة زادت سرعة v_{rms}؟

82. بيتٌ حجمه $770\ m^3$. (أ) ما الكتلة الكلية للهواء داخله عند 20^oC؟ (ب) إذا انخفضت درجة الحرارة إلى -10^oC، فما كتلة الهواء الذي يدخل من البيت أو يخرج منه؟

83. من القيمة المعلومة للضغط الجوي على سطح الأرض، خمّن العددَ الكلّيَّ لجزيئات الهواء في الغلاف الجويِّ الأرضي.

84. ما هي سرعة rms لجزيئات النيتروجين الموجودة في $7.6\text{-}m^3$ عند ضغط 4.2 atm إذا كان مقدار النيتروجين الكلي 1800 mol؟

85. أسطوانة أكسجين تستخدم في مستشفى لها ضغط مَقيس مقداره 2000 psi أي (13,800 kPa) وحجم 16 L ($0.016\ m^3$) عند $T = 295\ K$. لأيّ زمن سوف تدوم الأسطوانة إذا كان معدل الجريان المَقيس عند الضغط الجوي ثابتا عند 2.4L /min.

86. مكعب حديد يطفو في حوض زئبق عند 0^oC (أ) إذا رفعنا درجة الحرارة إلى 25^oC، فهل سيطفو المكعب أكثر أم أقلّ في الحوض؟ (ب) بأيّ نسبة سوف يتغير حجم الجزء المغمور؟

87. كثافة الكاز عند 0^oC هي $0.68 \times 10^3\ kg/m^3$. فما الكثافة في يوم حار 38^oC؟ ما نسبة التغير؟

88. إذا أُريد حزم الأرض عند خطِّ الاستواء بحزامٍ من الفولاذ بصورةٍ محكمة عند 25^oC، ولكن درجة الحرارة ارتفعت إلى 45^oC، فما ارتفاع الفولاذ فوق سطح الأرض بفرض التساوي في كلّ مكان؟

89. غطاء من النحاس الأصفر مثبتٌ بإحكام على جرَّةٍ من الزجاج عند 20^oC. للمساعدة في فتح الجرة؛ فإنّها توضع في ماء ساخن. بعد هذه المعالجة، كانت درجة الحرارة والغطاء 60^oC. القطر الداخلي للغطاء 8.0 cm عند 20^oC. جد الفرق في نصف القطر بسبب عملية التسخين هذه.

90. أوّل طولٍ عياريٍّ تمَّ تبنّيه في القرن الثامن عشر كان قضيبًا من البلاتين محدّدًا بعلامتين البعد بينهما 1 m. إذا كان هذا المقياس دقيقًا لدرجة $\pm\ 0.1\ \mu m$، فإلى أيِّ درجةٍ من الدقّة احتاج القائمون على ذلك إلى ضبط درجة الحرارة؟ معامل التمدّد الطوليّ للبلاتين هو $9 \times 10^{-6}C^{o-1}$.

91. يكون ضغط خزّان غوّاص عند ملئه 195 atm عند 20^oC. حجم الخزان هو 11.3 L.
(أ) ماذا سيكون حجم الهواء عند 1.00 atm ودرجة الحرارة نفسها؟ (ب) يستهلك الشخص قبل دخوله الماء 2.0 L هواء في كلّ شهيق، ويتنفس 12 مرة في الدقيقة. لهذا المعدل، كم سيدوم الخزان؟ (جـ) عند عمق 20.0 m في ماء البحر ودرجة حرارة 10^oC، كم سيدوم هذا الخزان بفرض أنّ معدل التنفس لم يتغير؟

92. تساوي سرعة الإفلات من الأرض $1.12 \times 10^4\ m/s$، ولهذا، فإنّ جُزيء غازٍ ينتقل بعيدًا عن الأرض بالقرب من الحافة الخارجة للغلاف الجويّ الأرضي سوف (وبهذه السرعة) يكون قادرًا على الإفلات من مجال جذب الأرض. عند أيّ درجة حرارة يكون متوسط سرعة.
(أ) جزيء أكسجين؟ (ب) ذرات هيليوم تساوي $1.12 \times 10^4\ m/s$؟ (جـ) لِمَ يحتوي غلافنا الجويُّ على الأكسجين وليس الهيليوم.

93. غطاء علبة نفايات كتلته 1.0 kg يعلّق ضدّ الجاذبية بواسطة قذفه رأسيًا نحو الأعلى بكرات تنس. كم كرةَ تنس يجب أن ترتدّ في الثانية عن الغطاء (ارتداد تام المرونة)؟ كتلة الكرة الواحدة 0.060 kg وسرعتها 12 m/s.

94. غوّاص ينفث فقاعة هواء كرويَّةً قطرها 3.00 cm عند عمق 14.0 m في بحيرة. افرض أنّ الحرارة ثابتة عند 298 K، والهواء يتصرف كغاز مثالي. ما حجم هذه الفقاعة عند وصولها إلى السطح.

*95. احسب الضغط الكلي لبخار الماء في الهواء في اليومين التاليين:
(أ) يوم صيف حار 30^oC ورطوبة نسبية 40% (ب) يوم شتاء بارد 5^oC ورطوبة نسبية 80%.

*96. حجم الهواء في ساونا $7.0\ m^3$، ودرجة حرارة 90^oC. الهواء جافٌّ تمامًا. كم يلزم من الماء (بالكيلوغرام) ليتبخر إذا أردنا زيادة الرطوبة النسبية من 0% إلى 10%؟ انظر (جدول 13 - 3).

*97. احسب النسبة المئوية للفرق في كثافة الحديد عند STP وعندما يكون في باطن الأرض عند درجة 2000^oC. وضغط 5000 atm. افرض معامل الجرم $90 \times 10^9\ N/m^2$ ومعامل التمدد الحجمي لا يتغير مع الحرارة ويبقى بالقيمة عند STP .

*98. (أ) استعمل قانون الغاز المثالي لبرهان أنّ الغاز مثالي عند ضغط ثابت، معامل التمدد الحجمي يساوي $\beta = 1/T$، حيث T درجة الحرارة بالكلفن. قارن مع (الجدول 13 - 1) للغازات عند $T = 293\ K$. (ب) برهن أنّ معامل الجرم (البند 9-5) للغاز المثالي عند درجة حرارة ثابتة هو $B = P$، حيث P الضغط.

*99. في الأجواء الرطبة، يعمد الناس باستمرار لتقليل الرطوبة في قبو التخزين لمنع العفن والعفن الفطري. إذا كان القبو في بيت (20^oC) مساحته $95\ m^2$، وارتفاع السقف 2.8 m، فما كتلة الماء الواجب إزالتها لخفض الرطوبة من 95% إلى 30%؟

إجابات التمارين

أ: $-40^oC = -40^oF$

جـ: أقلّ

ب: 24.0 L

د: $3.5 \times 10^{-9}\ m/s$



تقوم الملابس الدافئة بدور عوازل في الجوّ البارد للتقليل من كميَّةِ الحرارة المفقودة من الجسم البشري إلى محيطه الخارجي عن طريق التوصيل والحمل. وتعمل نار المخيّم على تدفئتك وتدفئة ملابسك. كما تستطيع النار أيضاً نقل الطاقة مباشرةً عن طريق التوصيل الحراريّ لكلّ ما تـــقوم بطهيه. وتُعدّ الحرارةُ انتقالاً للطاقة مثل الشغل تماماً.وتُعرَّف الحرارة على أنّها انتقال للطاقة بسبب الاختلاف في درجات الحرارة. وهناك مبدأ مفيد آخر وهو أنّ الطاقة الداخلية U هي المجموع الكلي لطاقات جزئيات النظام جميعها.

الفصل 14

الحرارة

عندما نضع قدراً مملوءًا بالماء البارد على حارقة موقد ساخنة ستزداد درجة حرارة الماء. ونقول بأنّ الحرارة "ستنساب" من الحارقة الساخنة إلى الماء البارد. وعندما يتلامس جسمان مختلفان في درجة الحرارة، فإنّ الحرارة تنساب تلقائيًّا من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد. ويستمر الانسياب التلقائي للحرارة حتى تتعادل درجتا الحرارة. وإذا تُرك الجسمان متلامسين فترةً طويلةً كافيةً كي تتعادل درجتا حرارتيهما، عندها يُقال بأنّ الجسمين يخضعان لاتزانٍ حراريٍّ، حيث يتوقف بعدها الانسياب الحراريُّ بينهما. فعلى سبيل المثال، عندما يُوضع ميزان الحرارة في الفم فإنّ الحرارة تنساب من داخل تجويف الفم إلى الميزان. وعندما تصل درجة حرارة الميزان إلى درجة حرارة تجويف الفم نفسها، يقال إن ميزان الحرارة والفم قد وصلا إلى الاتزان، ليتوقف عندئذٍ أيّ انسياب للحرارة.

وغالباً ما يتمُّ الخلط بين كلّ من الحرارة ودرجة الحرارة، وهما مفهومان مختلفان تماماً. لذا، سنميّز بين هذين المفهومين بكلّ وضوح في هذا الفصل بما لا يدع مجالاً لأيّ لبس. وسنبدأ بتعريف مفهوم الحرارة واستخدامه. كما سنناقش أيضاً كيفية استخدام الحرارة في المسعر الحراري، ومدى ارتباط الحرارة بتغيير حالات المادة وعمليات انتقال الحرارة المختلفة مثل: التوصيل، والحمل، والإشعاع.

1-14 الحرارة كانتقال للطاقة

ونتكلّم بشكلٍ عام عن انسياب الحرارة: كانسيابها من حارقة الموقد إلى وعاء الحساء، أو من الشّمس إلى الأرض، أو من تجويف فم شخص إلى ميزان الحرارة. وتنساب الحرارة تلقائياً من الجسم ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الجسم ذي درجة الحرارة الأخفض. وبالطبع، فإنّ نموذج القرن الثامن عشر للحرارة يصوّر انسياب الحرارة كحركة محتوى مائع سُمّي الحراريّ. ومع هذا، فلم يستطع أحد قياس هذا المائع الحراريّ أو اكتشافه. وأمّا في القرن التاسع عشر، فقد تمّ التوصل إلى إمكانية وصف مختلف أنواع الظواهر المرتبطة بالحرارة بطريقة منسجمة عندما استخدم نموذج جديد يتعامل مع الحرارة على أنّها شكلٌ من أشكال الشغل، كما سيتمّ مناقشتها بعد قليل. ويجب أنْ نلاحظ أولاً أنّ هناك وحدة عامة للحرارة لا تزال تستخدم إلى يومنا هذا منسوبة إلى السّعر، تُدعى "السّعر الحراريّ". واختصارها "سعر" (cal). وقد عُرّفت على أنّها "كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة". وللدقة: فإنّ مدى درجة الحرارة تحديداً هو من 14.5°C إلى 15.5°C؛ لأنّ الحرارة المطلوبة تختلف اختلافاً طفيفا عند الدرجات المختلفة. ويقل مقدار هذا الاختلاف عن 1% خلال المدى 0 إلى 100°C مما يسهل علينا إهماله في معظم الحالات. في حين تستخدم الوحدة التالية أكثر من استخدام السعر وهي الكيلو سعر (kcal) وتعادل 1000 سعر. وعليه، فإنّ كيلو سعر واحد (1 *kcal*) يعني مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء 1 C°. وغالباً ما يتم التعامل مع الكيلو سعر ويشار إليه وكأنه سعر ولكنه يُكتب باللغة الإنجليزية بالحرف الكبير (أي C) للدلالة على قيمته (1000 =سعر). وهذه هي الوحدة المستخدمة للدلالة على مقدار ما يحتويه الطعام من طاقة. وتبعاً لنظام الوحدات البريطاني، فيتم قياس الطاقة بدلالة الوحدات الحرارية البريطانية (Btu). وتمّ تعريف وحدة واحدة منها (1 Btu) على أنها الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 lb من الماء درجة فهرنهايتية واحدة (1 F°). ومن الممكن إثبات أن 1 Btu = 0.252 kcal = 1055 J (مسألة 4).

وقد تابع عدد من علماء القرن التاسع عشر فكرة ارتباط الحرارة بالطاقة ومن ضمنهم العالم الإنجليزي جيمس جول (1818–1889). وأجرى جول وآخرون عدداً من التجارب الأساسية التي ساهمت في صياغة فهمنا الحالي للحرارة على أنها انتقال للطاقة مثل الشغل. وتظهر إحدى تجارب جول (المبسطة) في (الشكل 14 − 1) حيث يسبّب سقوط الثقل دوران العجلة المجنحة. ويعمل الاحتكاك بين الماء والعجلة المجنحة على رفع درجة حرارة الماء بمقدار ضئيل جدًّا (يكاد يكون مقيسًا). ويمكن الحصول على الارتفاع نفسه في درجة الحرارة عن طريق تسخين الماء باستخدام موقد ساخن. وحدّد جول في هذه التجربة وتجارب أخرى كثيرة (يرتبط بعضها بالطاقة الكهربائية) أن مقدار الشغل المبذول يكافئ دائماً مقدار الحرارة المدخلة. ووُجد كمياً أن شغلاً مقداره 4.186 J يكافئ 1 سعر (1 cal) من الحرارة. وهذا ما يعرف **بالمكافئ الميكانيكيّ للحرارة**:

$$4.186\ \text{J} = 1\ \text{cal}$$

$$4.186\ \text{kJ} = 1\ \text{kcal}$$

وبناءً على هذه التجارب وتجارب عديدة أخرى، فقد فسر العلماء أن الحرارة ما هي إلاّ انتقال للطاقة؛ أي أنها ليست مادة أو شكلاً من أشكال الطاقة. وعليه، فعند انسياب الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد فإنّ الطاقة هي التي تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد. ونقول بأنّ الحرارة هي انتقال للطاقة من جسم إلى آخر بسبب الاختلاف بين درجتي حرارتيهما. وبدلالة الوحدات الدولية *(SI)*، فإنّ وحدة الحرارة هي الجول، وهي الوحدة المستخدمة لأنواع الطاقة جميعها على اختلافها. ومع هذا، فإن استخدام السعر أو الكيلو سعر مازال قائما أحياناً. ويُعرّف السعر في وقتنا الحالي بدلالة الجول (من خلال المكافئ الميكانيكيّ للحرارة) بدلاً من تعريفه بدلالة صفات الماء كما أعطي سابقاً. ولا يزال التعريف الأخير مستخدما لسهولته: يرفع السّعر الواحد غراما واحدا من الماء درجة مئوية واحدة، أو يرفع *1 g* سعر درجة حرارة *1 kg* من الماء درجة مئوية واحدة.

وعندما نستخدم كلمة"حرارة" فنعني انتقال الطاقة من مكانٍ أو جسمٍ ما إلى آخر عند درجة حرارةٍ أقلّ.

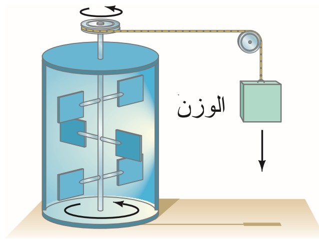
⚠ تنويه !

الحرارة ليست مائعا

السعر (وحدة)

كيلو سعر (السعر الغذائي)

BTU وحدة الحرارة البريطانية



الشكل 14 − 1 تجربة جول عن المكافئ الميكانيكيّ للحرارة.

المكافئ الميكانيكيّ للحرارة.

تعريف الحرارة: انتقال الطاقة بسبب ΔT.

⚠ تنويه !

تشير الحرارة إلى انتقال الطاقة لا إلى الطاقة نفسها.

كانت نتيجة "جول" أساسية؛ لأنّها وسّعت مبدأ الشغل والطاقة ليشمل العمليات المرتبطة بالحرارة. كما أنها أفضت إلى إثبات قانون حفظ الطاقة الذي سنناقشه بتفصيل أكثر في الفصل التالي.

المثال 14-1 قدّر التخلص من السعرات الزائدة

لنفترض أنّ شخصاً ما قام بأكل كميّةٍ كبيرةٍ من البوظة والحلوى تعادل 500 وحدة غذائية. وللتخلّص من هذه السّعرات الزائدة، أراد أن يقوم ببذل مقدار مكافئ من الشغل عن طريق تسلّق درج أو حبل. فما الارتفاع الكلّيّ الذي يجب أن يتسلقه؟ افترض أن كتلة المتسلق تعادل 60 kg (من أجل هذه الحسابات فقط).

النهج: يعادل مقدار الشغل المبذول (W) في صعود الدرج التغيّر في طاقة الوضع. "$W = \Delta PE = mgh$" حيث تمثل h الارتفاع الرأسيّ المتسلّق.

الحـل: إن 500 C هي 500 kcal وبدلالة الجول:

$$(500\,\text{kcal})(4.186 \times 10^3\,\text{J/kcal}) = 2.1 \times 10^6\,\text{J}.$$

والشغل المبذول لتسلّق الارتفاع الرأسيّ h هو $W = mgh$. ونحلّ لإيجاد h:

$$h = \frac{W}{mg} = \frac{2.1 \times 10^6\,\text{J}}{(60\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2)} = 3600\,\text{m}.$$

وهذا التغيّر في الارتفاع هائل جداً (أكثر من 11,000 ft).

ملحوظة: لا يستطيع الجسم البشري تحويل الطاقة بكفاءة 100%. بل قد تصل كفاءته في التحويل إلى 20%. وكما سنناقش في الفصل القادم، فإن جزءاً من الطاقة "يتمّ فقده". وعليه فعلى المتسلق أن يرتقي إلى الأعلى حوالي $(0.2)(3600\,\text{m}) \approx 700\,\text{m}$ وهو ارتفاع لا يزال كبيراً (حوالي 2300 ft).

تطبيق الفيزياء
التّخلص من السّعرات الحراريّة

14-2 الطاقة الداخلية

يشار إلى مجموع الطاقات الكلّيّ لجزيئات الجسم جميعها بالطاقة الداخلية. (ويستخدم في بعض الأحيان مصطلح الطاقة الحرارية للدلالة على الشيء نفسه). وسنعرّف الآن مبدأ الطاقة الداخلية لأنها ستساعد في توضيح الأفكار المطروحة عن الحرارة.

الطاقة الداخلية

التمييز بين درجة الحرارة، والطاقة الداخلية، والحرارة

باستخدام نظرية الحركة، نستطيع توضيح الفرق بين كلٍّ من درجة الحرارة، والطاقة الداخلية، والحرارة. إنّ درجة الحرارة (بالكلفن) هي مقياس متوسط الطاقة الحركية للجزيئات الفردية. في حين تشير الطاقة الداخلية للجسم إلى الطاقة الكلية الحركية لجزيئاته جميعها. (وبناءً على ذلك، فإنّ سبيكتين ساخنتين من الحديد متساويتين في الكتلة لهما درجة الحرارة نفسها ستمتلكان معاً من الطاقة الحرارية ضعفي ما تمتلكه كلّ واحدة منهما على حدة). أمّا الحرارة فتشير إلى انتقال الطاقة من جسم إلى آخر بسبب الاختلاف في درجتي حرارتيهما.

تنويه !
التمييز بين الحرارة وكلٍّ من الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة.

لاحظ أنّ اتجاه انسياب الحرارة بين أي جسمين يعتمد على درجة حرارتيهما لا على مقدار ما يملك كلّ منهما من طاقة داخلية. ولهذا، إذا خُلِط 50 g من ماءٍ درجة حرارته 30°C مع 200 g أخرى من ماءٍ درجة حرارته 25°C فإنّ الحرارة ستنساب من الماء الذي درجة حرارته 30°C إلى الماء الذي درجة حرارته 25°C، على الرّغم من أن الطاقة الداخلية الكلية للماء الذي عند 25°C أكبرنتيجةً لكبركمية الماء عند تلك الدرجة.

تنويه !
يعتمد اتجاه انسياب الحرارة على درجة الحرارة (وليس على كمية الطاقة الداخلية).

الطاقة الداخلية للغاز المثالي

دعنا نحسب الطاقة الداخلية لـ n مول من غاز مثالي أحادي الذرّة (أي أنّ كلّ جزيء منه يتكون من ذرة واحدة). إنّ الطاقة الداخلية U هي مجموع الطاقات الحركية الانتقالية للذرات جميعها. ويعادل هذا المجموع متوسط الطاقة الحركية لكلّ جُزيءٍ مضروبًا في عدد الجزيئات الكلّي N:

$$U = N(\tfrac{1}{2} m\overline{v^2})$$

وباستخدام (المعادلة 13 –8): $\overline{KE} = \tfrac{1}{2} m\overline{v^2} = \tfrac{3}{2} kT$

نستطيع كتابة هذا كالتالي:

$$U = \tfrac{3}{2} NkT$$

أو (نتذكر من البند 13 – 9)

$$U = \tfrac{3}{2} nRT \quad \text{[غاز مثالي أحادي الذرة]} \quad (14-1)$$

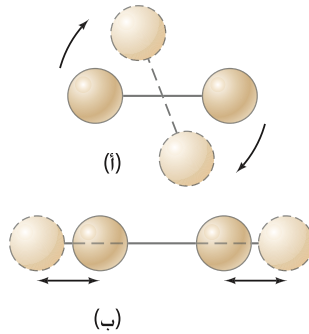
الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة

حيث n عدد المولات. وعليه، فإنّ الطاقة الداخلية للغاز المثالي ستعتمد على كلّ من درجة الحرارة وعدد مولات الغاز فقط.

وإذا احتوت جزيئات الغاز على أكثر من ذرة واحدة، فعندها يجب أن يؤخذ بالحسبان طاقة الجزيئات الدورانية والاهتزازية (الشكل 14 – 2). وستكون الطاقة الداخلية في هذه الحالة أكبر عند درجة حرارة معينة مقارنة بتلك الطاقة للغاز أحادي الذرة. ومع هذا، ستبقى دالة في درجة الحرارة فقط للغاز المثالي.

ومع أن الطاقة الداخلية للغازات الحقيقية تعتمد بصورة عامة على درجة الحرارة، فإنها ستعتمد أيضاً إلى حدّ ما على الضغط والحجم (بسبب طاقة الوضع الذرية) خصوصاً عندما يتصرف الغاز بعيداً عن صفاته المثالية.

وتعدّ الطاقة الداخلية للسوائل والمواد الصلبة أمراً معقداً جدّاً لاحتوائها على طاقة الوضع الكهربائية المرتبطة بالقوى (أو الروابط "الكيميائية") بين الذرات والجزيئات.



الشكل 14 - 2 بالإضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية، تستطيع الجزيئات امتلاك : (أ) طاقة حركية دورانية. (ب) طاقة اهتزازية (طاقة حركية وطاقة مخزنة).

3-14 الحرارة النّوعيّة

العلاقة بين انتقال الطاقة و التغير في درجات الحرارة

الحرارة النوعية

عندما تنساب الحرارة إلى داخل جسم ما، فإنّ درجة حرارته سترتفع (على افتراض عدم تغير طوره) . ويصبح السؤال الآن: ما مقدار الارتفاع في درجة الحرارة؟ ستعتمد الإجابة على المعطيات. فمنذ بداية القرن الثامن عشر، أوضحت التجارب أنّ كميّة الحرارة Q الضرورية لتغيير درجة حرارة مادة ما تتناسب طرديًّا مع كلٍّ من كتلة المادة الموجودة، والتغيّر في درجة الحرارة ΔT. ويمكن التعبير عن هذه البساطة المدهشة في الطبيعة بالمعادلة التالية:

$$Q = mc\,\Delta T \quad (14-2)$$

حيث تمثّل c كميّةً مميّزةً للمادة تُسَمّى الحرارة النّوعيّة. ولأنّ $c = Q/m\Delta T$، فإنّ وحدة الحرارة النوعية هي $\text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ$ (الوحدة الدولية المناسبة) أو $\text{Kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ$. وتعطى قيمة c للماء عند 15°C وتحت ضغطٍ جوّيٍّ ثابت ($= 1$ atm) كالتالي $c = 4.19 \times 10^3\ \text{J/kg}$ أو $1.00\text{kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ$. ونقول: يلزم 1 كيلو سعر من الحرارة لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء درجة مئوية واحدة. ويعرض (الجدول 14 – 1) قيم حرارة نوعية لمواد أخرى عند 20°C. تعتمد قيم c إلى حدّ ما على درجة الحرارة (وكذلك على الضغط بشكل أقل) ويمكن اعتبار c ثابتةً إذا كانت التغيرات في درجة الحرارة صغيرة.

الجدول (14 – 1) الحرارة النوعية

(عند ضغط جوي ثابت و 20°C إلا إذا ذُكِر غير ذلك)

المادة	الحرارة النوعية c kcal/kg·°C (= cal/g·°C)	J/kg·°C
ألمنيوم	0.22	900
كحول (إيثيل)	0.58	2400
نحاس	0.093	390
زجاج	0.20	840
حديد أو فولاذ	0.11	450
رصاص	0.031	130
رخام	0.21	860
زئبق	0.033	140
فضة	0.056	230
خشب	0.4	1700
ماء		
ثلج (-5°C)	0.50	2100
سائل(51°C)	1.00	4186
بخار(110°C)	0.48	2010
الجسم البشري (متوسط)	0.83	3470
بروتين	0.4	1700

المثال 14-2 اعتماد انتقال الحرارة على الحرارة النّوعيّة.

لرفع درجة حرارة خزّانٍ كبيرٍ من الحديد فارغ كتلته 02-gk من 10°C إلى 90°C؟ (ب) ماذا يحدث عندما يملأ الخزان بـ 20 kg من الماء؟

النهج: نطبق (المعادلة 14 – 2) للمواد المعنية جميعها.

الحل : (أ) يتكوّن نظامنا من خزّان الحديد الكبير فقط. ومن (الجدول 14 – 1)، فإنّ الحرارة النوعية للحديد هي $450\ \text{J/kg.C}^\circ$. والتغيّر في درجة الحرارة هو $(90^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 80^\circ\text{C}$. وعليه فإنّ :

$$Q = mc\,\Delta T = (20\,\text{kg})(450\,\text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(80\,\text{C}^\circ) = 7.2 \times 10^5\,\text{J} = 720\,\text{kJ}$$

(ب) يتكوّن نظامنا الآن من خزّان الحديد الكبير بالإضافة إلى الماء. وسيتطلّب الماء بمفرده:

$$Q = mc\,\Delta T = (20\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(80\,\text{C}^\circ) = 6.7 \times 10^6\,\text{J} = 6700\,\text{kJ}$$

أو 10 أضعاف ما يتطلّبه وزنٌ مكافئٌ من الحديد تقريباً. ويصبح مجموع الحرارة المدخلة إلى خزان الحديد المحتوي على 20 kg من الماء هو $720\,\text{kJ} + 6700\,\text{kJ} = 7400\,\text{kJ}$.

ملحوظة: خضع كلٌّ من خزّان الحديد الكبير والماء في الفرع (ب) للتغيّر نفسه في درجة الحرارة $\Delta T = 80\,\text{C}^\circ$ ولكن مع اختلاف في حرارتيهما النوعية.

عند الحديث عن تبريد خزّان الحديد الكبير في الفرع (أ) من (المثال 14 − 2) من 90°C إلى 10°C. فهذا يعني أنّ 720 kJ من الحرارة قد انسابت من الخزّان إلى محيطها الخارجي. وبعبارةٍ أخرى فإنّ (المعادلة 14 − 2) صالحة سواءً كان انسياب الحرارة إلى الداخل أو إلى الخارج. والناجم عن الزيادة أو النقصان في درجات الحرارة. ولقد رأينا في الفرع (ب) أنّ الماء يتطلب تقريباً عشرة أضعاف كمية الحرارة التي تتطلبها كتلة مكافئة من الحديد لإحداث الفرق نفسه في درجات الحرارة. فالحرارة النوعية للماء هي من ضمن الأعلى بين المواد جميعها؛ وهذا ما يجعل من الماء مادة مثالية إمّا لتسخين الأنظمة الفضائية بالماء الساخن. أو للاستخدامات الأخرى التي تتطلب أدنى قدر من الهبوط في درجات الحرارة مقابل كميّةٍ معيّنةٍ من انتقال الحرارة. وغالباً. فإنّ الانتقال الحراري من المحتوى المائي في فطيرة التفاح هو الذي يسبب احتراق ألسنتنا عندما نتناول فطيرة ساخنة.

التأثيرات العملية للحرارة النوعية المرتفعة للماء

المثال المفاهيمي 14-3 وعاء طهي طعام ساخن جداً.

لنفترض أنّك نسيت وعاء طهي الطعام على الموقد لفترةٍ كافيةٍ. فارتفعت درجة حرارته إلى درجة عالية جداً (تصل إلى 200°C أو أكثر). ماذا يحدث عندما تُغرق الوعاءَ تماماً في عدّة بوصات من الماء البارد في أسفل حوضٍ لغسل الأطباق؟ وهل ستصبح درجة الحرارة النهائية في المنتصف تماماً بين درجتي الحرارة الابتدائيتين لكلّ من الماء البارد والوعاء الساخن؟ وهل سيبدأ الماء بالغليان؟ افترض أنّ كتلة الوعاء تعادل كتلة الماء تقريباً.

الإجابة: ستعلم من الخبرة أنّ الماء سيصبح دافئاً. ومع هذا لن تقترب درجة حرارته من درجة الغليان وربّما سترتفع من 10 إلى 20°C. وسيكون الارتفاع في درجة حرارة الماء أقلّ بكثيرٍ من الانخفاض في درجة حرارة الوعاء الساخن جدًّا. لماذا؟ بشكل عام. يعود السبب في ذلك إلى أن كتلة الماء تعادل بالتقريب كتلة الوعاء. أمّا الحرارة النوعية للحديد فهي أقل بمقدار عشرة أضعاف من تلك التي للماء (الجدول 14 − 1). وعندما تغادر الحرارة الوعاء لتدخل في الماء. فإن درجة حرارة الوعاء ستتغير بمقدار عشرة أضعاف التغير في درجة حرارة الماء. وبالمقابل. إذا تركت عدة قطرات من الماء تسقط على الوعاء. فإن هذا المقدار الضئيل من الكتلة المائية سيبدأ بالأزيز والغليان (لكبر كتلة الوعاء بمئات المرات مقارنةً بكتلة الماء).

الحرارة النوعية للغازات

تُعدّ الحرارة النوعية للغازات أكثر تعقيدًا من الحرارة النوعية للسوائل والمواد الصلبة التي تتغير درجات حرارتها (البند 13 − 4). فالغازات يتغير حجمها بشكل كبير جداً عند اختلاف درجات الحرارة تحت ضغط جوي ثابت كما رأينا في الفصل الثالث عشر من قوانين الغازات. أو كما رأينا من تغير كبير جدًّا في ضغط الغاز عند اختلاف درجات الحرارة وثبوت الحجم. وتعتمد حرارة الغاز النوعية بدرجة كبيرة على طريقة التغير في درجة الحرارة. وغالباً ما نتعامل مع الحرارة النوعية للغازات عند (أ) ضغط ثابت (c_P) أو (b) حجم ثابت (c_V). ويعرض(الجدول 14 − 2) بعض قيم الحرارة النوعية. حيث نرى أنّ c_P دائماً أكبر من c_V. وهذا الاختلاف عادةً ما يكون مهملًا بالنسبة إلى السوائل والمواد الصلبة. وهناك تفاصيل أكثر عن الحرارة النوعية للجزيئات ومناطق الطاقة المتماثلة في الملحق د.

جدول (14 − 2) الحرارة النوعية للغازات (kcal/ kg.C°)

الغاز	c_V (ضغط ثابت)	c_P (حجم ثابت)
بخار (100°C)	0.482	0.350
أكسجين	0.218	0.155
هيليوم	1.15	0.750
ثاني أكسيد الكربون	0.199	0.153
نيتروجين	0.248	0.177

14-4 المسعريّة (قياس الحرارة) – حلّ مسائل

الأنظمة

سوف نشير إلى أنظمةٍ محدّدةٍ عندما نناقش الحرارة والديناميكا الحراريّة. وكما تمّ ذكره في الفصول السابقة. فإنّ النّظام هو أيّ جسم أو مجموعة من الأجسام قيد الدراسة. وسنشير إلى كلّ شيء آخر في الكون على أنّه "بيئة" أو "محيط" النظام. وهناك عدة تصنيفات للأنظمة: **النظام المغلق** وهو النظام الذي لا يسمح بتبادل المادة بينه وبين محيطه (ولكنه يسمح بتبادل الطاقة مع محيطه الخارجي). أمّا في **النظام المفتوح**. فإنّه يسمح بمرور المادة منه أو إليه (وكذلك بالنسبة إلى الطاقة) . وهناك أنظمة (مثالية) كثيرة ندرسها في الفيزياء هي أنظمة مغلقة. وكذلك هناك أيضاً أنظمة كثيرة ومن ضمنها النباتات والحيوانات تُعدّ أنظمة مفتوحة؛ لأنّها تسمح بتبادل المادة مع محيطها (مثل الغذاء والأكسجين والفضلات الناتجة). ويُقال عن النظام المغلق أنّه **معزولٌ** إذا لم يُسمح بتبادل أيّ مقدار للطاقة مع محيطه مهما كان ضئيلاً. وإلاّ فإنّه لايُعدّ معزولاً.

وعندما تكون أجزاءً مختلفةً من النظام المعزول عند درجات حرارة مختلفة. فإنّ الحرارة ستنساب (انتقال الطاقة) من الجـــــزء ذي درجة الحـــرارة المرتفعة إلى الجزء ذي درجة

الحرارة المنخفضة – أي داخل النظام. وإذا كان النظام معزولاً تماماً، فلن ينتقل أيّ مقدارٍ من الطاقة منه أو إليه. ويترتّب على ذلك أن يقوم حفظ الطاقة بدورٍ مهّمٍ جدًّا. إنّ مقدار الطاقة المفقودة من جزءٍ من النظام تعادل مقدار الطاقة المكتسبة من جزءٍ آخر منه:

حفظ الطاقة

الطاقة المفقودة = الطاقة المكتسبة

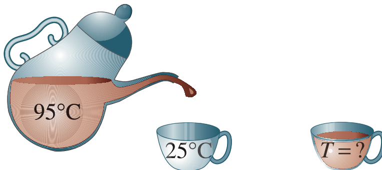
أو

الطاقة الخارجة من جزء = الطاقة الداخلة إلى جزء آخر

وتُعدّ هاتان العلاقتان البسيطتان مفيدتين جدًّا . ودعنا نأخذ مثالاً على ذلك.

المثال 14-4 **الشاي يبرد الكوب.**

إذا صُبَّ $200 cm^3$ من الشاي عند درجة حرارة $95°C$ في كوب من الزجاج كتلته 150-g عند درجة حرارة ابتدائية $25°C$ (الشكل $14-3$) فما درجة الحرارة المشتركة النهائية T لكلّ من الشّاي والكوب عندما يصلان إلى الاتزان مفترضاً عدم انسياب الحرارة إلى المحيط الخارجي؟



الشكل 14 – 3 (المثال 14 - 4)

النهج: سنطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام المكون من الشاي والكوب الذي سنفترضه معزولاً عن محيطه الخارجي: أيْ أنّ الحرارة التي ستغادر الشاي ستنساب إلى داخل الكوب. ونستطيع استخدام معادلة الحرارة النوعية لتحديد علاقة انسياب الحرارة مع التغير في درجات الحرارة.

الحل: بما أنّ معظم الشّاي ماءٌ، فإن حرارته النوعية هي $4186 J/kg\cdot C°$ (الجدول $14-1$) وأمّا كتلته m فهي كثافته مضروبة في حجمه ($V = 200\,cm^3 = 200\times 10^{-6}\,m^3$):

$[m = \rho V = (1.0\times 10^3\,kg/m^3)(200\times 10^{-6}\,m^3) = 0.20\,kg]$ ونستخدم (المعادلة $14-2$) ونطبق حفظ الطاقة، ونعدّ T تمثل درجة الحرارة النهائية المجهولة:

الطاقة التي يكسبها الكوب = الطاقة التي يفقدها الشّاي

$$m_{tea}c_{tea}(95°C - T) = m_{cup}c_{cup}(T - 25°C).$$

وبعد إدخال الأرقام واستخدام (الجدول $14-1$) ($c_{cup} = 840\,J/kg\cdot C°$). نحلّ لإيجاد T:

$$(0.20\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(95°C - T) = (0.15\,kg)(840\,J/kg\cdot C°)(T - 25°C)$$
$$79{,}500\,J - (837\,J/C°)T = (126\,J/C°)T - 3150\,J$$
$$T = 86°C.$$

وتنخفض درجة حرارة الشاي بمقدار $9\ C°$ ليصبح في حالة اتزان مع الكوب.

ملحوظة: تزداد درجة حرارة الكوب بمقدار $86°C–25°C=61\ C°$. ويرتبط التغير الكبير في درجة حرارة الكوب مقارنة مع التغير الضئيل في درجة حرارة الشاي بحرارة الكوب النوعية الصغيرة مقارنةً مع حرارة الشاي النوعية المرتفعة.

ملحوظة: تعدّ ΔT في هذه الحسابات (في المعادلة $14-2$ حيث $Q = mc\,\Delta T$) كمية موجبة على طرفي معادلة حفظ الطاقة. فعلى يسار المعادلة "الحرارة المفقودة" حيث تمثل ΔT درجة الحرارة الابتدائية مطروحاً منها درجة الحرارة النهائية $(95°C - T)$. وأمّا على يمين المعادلة، فتمثل "درجة الحرارة المكتسبة" ΔT وهي درجة الحرارة النهائية مطروحاً منها درجة الحرارة الابتدائية. ومع هذا، انظر إلى طريقة الحلّ البديلة التالية:

⚠ تنويه:

عند استخدام
الحرارة المفقودة = الحرارة المكتسبة
فإنّ ΔT هي كمية موجبة على طرفي المعادلة.

حلّ بديل: نستطيع إعادة حلّ هذا المثال (وأمثلة أخرى) بطريقة مختلفة. ونستطيع أن نبدأ بجعل مجموع الحرارة المنتقلة إلى داخل النظام المعزول أو إلى خارجه مساوياً للصفر:

توجيه لحلّ الأسئلة.

طريقة حلّ بديلة : $\sum Q = 0$

$$\Sigma Q = 0$$

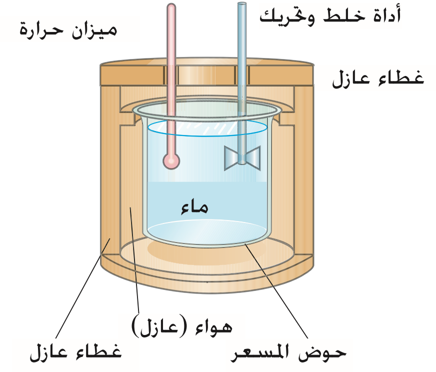
ونعوّض عن كلّ حدّ بعد ذلك بدلالة $Q = mc(T_f - T_i)$ حيث $\Delta T = T_f - T_i$ تمثل دائماً درجة الحرارة النهائية مطروحاً منها درجة الحرارة الابتدائية لتحتمل ΔT بعد ذلك أن تكون موجبة أو سالبة. وفي المثال الحالي :

$$\Sigma Q = m_{cup}c_{cup}(T - 25°C) + m_{tea}c_{tea}(T - 95°C) = 0$$

وبالطبع، فإنّ الحدّ الثاني هو كمية سالبة حيث T أقل من $95°C$. وبالتعويض بلغة الأرقام نصل إلى الجواب النهائي السابق نفسه.

ويستخدم المسعر الحراريّ لأخذ مثل تلك القراءات حيث يُظهر (الشّكل $14-4$) مسعرَ ماء حراريًّا بسيطًا.

ومن المهمّ جدًّا أن يكون المسعرُ معزولًا تمامًا، كي يمنع أيَّ تبادلٍ للحرارة مع المحيط الخارجيّ. ومن أهمّ تطبيقات المسعر الحراريّ استخدامُه لتحديد الحرارة النوعية للمواد. وفي التقنية المعروفة "بطريقة النماذج". تسخّن عينة من المادة إلى درجة حرارة عالية جداً تقاس بدقة متناهية. ثمّ تُوضع هذه المادة بسرعة في ماء بارد داخل المسعر. وسيكتسب الماء وكوب المسعر الحرارة المفقودة من العينة. وبعد قياس درجة الحرارة النهائية للمزيج يتم حساب الحرارة النوعية كما هو مبين في المثال التالي:



الشكل 14 – 4 مسعر الماء الحراري البسيط

المثال 14-5 تحديد حرارة نوعية مجهولة باستخدام المسعر الحراريّ.

يرغب أحد المهندسين في تحديد الحرارة النوعية لسبيكة فلزّيّة جديدة. فقام بتسخين عينة من السّبيكة كتلتها 0.15-kg إلى درجة حرارة 540°C. ثمّ وضعها سريعاً في كوب يحتوي ماء كتلته 400 g. ودرجة حرارته 10.0°C. علماً بأنّ كوبَ المسعِر الحراري 200-g مصنوع من مادة الألمنيوم. (لا حاجة هنا إلى معرفة كتلة الغلاف العازل؛ لاعتقادنا بأنّ كميّةَ الهواء المحصورة بين الكوب والغلاف كافية لعزلهما عن بعضهما بعضًا لتبقى درجة حرارة الغلاف دون أيّ تغيّر يذكر). فإذا كانت درجة حرارة النظام النهائية 30.5°C. فاحسب الحرارة النّوعيّة للسّبيكة.

النهج: نطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام الذي يتكون من السبيكة العينة. والماء. وكوب المسعر.

الحلّ: الحرارةُ المفقودةُ تعادلُ الحرارةَ المكتسبة:

(الحرارة المكتسبة بوساطة كوب المسعر الحراري) + (الحرارة المكتسبة في الماء) = (الحرارة المفقودة من السبيكة)

$$m_{\mathrm{a}} c_{\mathrm{a}}\, \Delta T_{\mathrm{a}} = m_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{w}}\, \Delta T_{\mathrm{w}} + m_{\mathrm{cal}} c_{\mathrm{cal}}\, \Delta T_{\mathrm{cal}}$$

حيث تشير الرموز a. و w. و cal إلى كلّ من السبيكة. والماء. والمسعر الحراري على الترتيب وأمّا الفرق في درجة الحرارة فهو كمية موجبة ($\Delta T > 0$). وعندما نعوّض بالأرقام. ونستخدم (الجدول 14 – 1) فإنّ المعادلة تصبح كالتالي:

$$\begin{aligned}(0.150\,\mathrm{kg})(c_{\mathrm{a}})(540°\mathrm{C} - 30.5°\mathrm{C}) &= (0.40\,\mathrm{kg})(4186\,\mathrm{J/kg\cdot C°})(30.5°\mathrm{C} - 10.0°\mathrm{C}) \\ &\quad + (0.20\,\mathrm{kg})(900\,\mathrm{J/kg\cdot C°})(30.5°\mathrm{C} - 10.0°\mathrm{C}) \\ 76.4\, c_{\mathrm{a}} &= (34{,}300 + 3700)\,\mathrm{J/kg\cdot C°} \\ c_{\mathrm{a}} &= 500\,\mathrm{J/kg\cdot C°}\end{aligned}$$

وعند إجراء هذه الحسابات. قمنا بإهمال أيّ كمية من الحرارة انتقلت إلى ميزان الحرارة والمحرّك (الذي استخدم لتسريع عملية انتقال الحرارة. وبالتالي التقليل من الحرارة المفقودة إلى الخارج). ويمكن أخذ هذه الكمية من الحرارة المنتقلة بالحسبان عن طريق إضافة عدة حدود إلى الجانب الأيمن للمعادلة أعلاه. لينتج بناءً عليه تصحيح بسيط جداً لقيمة c_{a} (انظر المسألة 14).

كن حذراً في الأمثلة والمسائل جميعها من هذا النوع. بحيث لا تهمل أيّ جسم يفقد حرارة أو يكتسبها (بدرجة معقولة). وفي المثال أعلاه. وعلى جانب المعادلة الأيسر؛ أيْ جانب "الحرارة المفقودة". فقد تمّ التّعرّف إلى الحدّ الوحيد هنا. والمحتوي على السبيكة المعدنية الساخنة. أما على الجانب الآخر؛ أيْ جانب الحرارة المكتسبة" فقد أضيف الحدّان المحتويان على الماء وكوب المسعر الحراري المصنوع من الألمنيوم. ولتسهيل هذا؛ فقد تمّ إهمال كتلتين لأنهما صغيرتان جدًّا مثل كتلة ميزان الحرارة والمحرك اللتين كانتا ستؤثران بشكل طفيف جدًّا في اتزان الطاقة.

توجيه لحلّ الأسئلة.
تأكد من أخذ مصادر انتقال الطاقة جميعها بالحسبان

ويُستخدم **المسعر التفجيري (المسعر القنبلة)** لقياس الطاقة الحرارية المنبعثة عند احتراق مادة ما. ومن التطبيقات المهمّة على ذلك. حرق الطعام لتحديد محتواه من السعرات الحرارية وحرق البذور ومواد أخرى لتحديد "محتواها من الطاقة" أو حرارة احتراقها. ويتمُّ ذلك عن طريق وزن عيّنةٍ من المادة المعنيّة بدقة متناهية. ثمّ وضعها مع كمية فائضة من الأكسجين عند ضغطٍ عالٍ في وعاء مغلق تماماً ("القنبلة"). ثم وضع القنبلة في ماء المسعر الحراري. وتسخين السلك المار في القنبلة بسرعةٍ مّا يسبب احتراق المزيج. وعندها ستكتسب القنبلة والماء الطاقة المنبعثة من عملية الاحتراق.

تطبيق الفيزياء
قياس المحتوى الحراري.

المثال 14-6 **قياس محتوى الطاقة لقطعة حلوى.**

سُمِح لعينة حلوى كتلتها 100 g أنْ تجفّ قبل وضعها في المسعر الحراري القنبلة. ووُضعت القنبلة المصنوعة من الألمنيوم (كتلتها = 0.165 kg) في كوب مسعر حراري مصنوع من الألمنيوم كتلته 0.524 kg يحتوي على 2.00 kg من الماء. حدّد محتوى الطاقة لقطعة حلوى كتلتها 10-g إذا علمت أنّ درجة حرارة النظام الابتدائية هي 15.0°C، ودرجة حرارته بعد الاحتراق هي 36.0°C.

النهج: نفترض أن النظام معزول ومكوّن من عيّنة الحلوى، وكوب المسعر الحراري، والماء. ونطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام.

الحلّ: الطاقة المنبعثة Q من احتراق الحلوى في هذه الحالة يتم امتصاصها بوساطة النظام المكون من القنبلة، والمسعر الحراري، والماء:

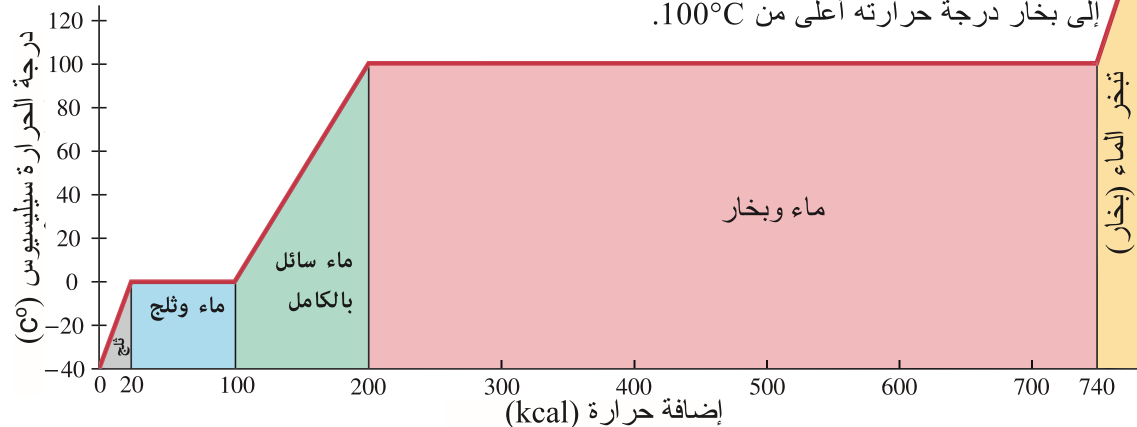
$$\begin{aligned} Q &= (m_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{w}} + m_{\mathrm{cal}} c_{\mathrm{cal}} + m_{\mathrm{bomb}} c_{\mathrm{bomb}})\,\Delta T \\ &= \big[(2.00\,\mathrm{kg})(1.0\,\mathrm{kcal/kg\cdot C^\circ}) + (0.524\,\mathrm{kg})(0.22\,\mathrm{kcal/kg\cdot C^\circ}) \\ &\quad + (0.615\,\mathrm{kg})(0.22\,\mathrm{kcal/kg\cdot C^\circ})\big][36.0^\circ\mathrm{C} - 15.0^\circ\mathrm{C}] = 47\,\mathrm{kcal} \end{aligned}$$

وبدلالة الجول: $Q = (47\,\mathrm{kcal})(4186\,\mathrm{J/kcal}) = 197\,\mathrm{kJ}$ وبما أنّ 47 kcal انبعثت من احتراق 10 g من الحلوى، فإنّ 100-g من الحلوى ذاتها ستحتوي على 470 من سعرات الطعام الحرارية (470°C) أو 1970 kJ.

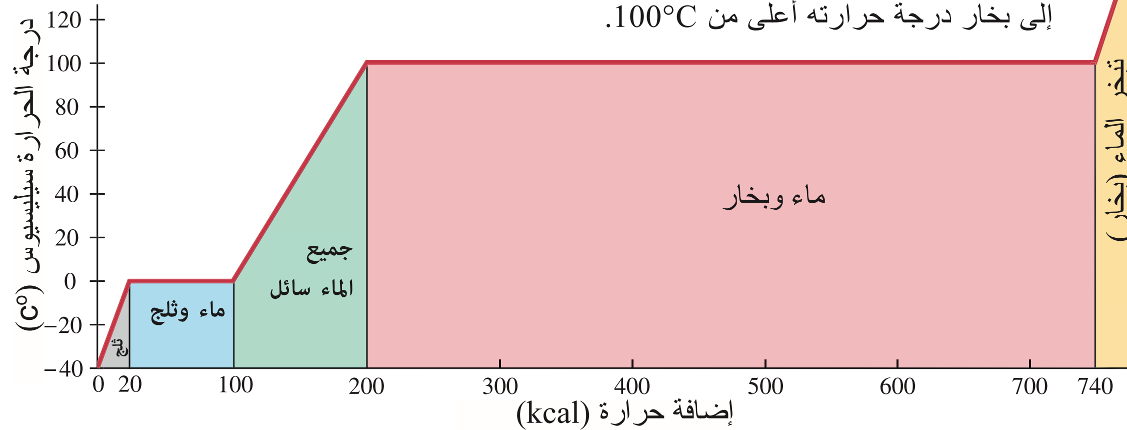
14-5 الحرارة الكامنة

عندما تغيّر المادة طورها من الصلب إلى السائل، أو من السائل إلى الغازي (انظر أيضاً البند 13 – 12) فإنّها بحاجة إلى مقدارٍ معيّن من الطاقة يساعدها على تغيير طورها. وعلى سبيل المثال، دعنا نتتبع ما يحدث عندما نسخّن مكعب ثلج كتلته 1.0-kg، ودرجة حرارته 40°C– بمعدّلٍ بطيءٍ وثابت إلى أن يتحوّل كلّه إلى ماء، ثم نسخّن الماء (السائل) الناتج إلى 100°C ليتحوّل كاملاً إلى بخار، ثمّ نسخّن البخار لدرجة أعلى من 100°C علماً بأنّ مراحل التسخين جميعها أُجريت عند ضغط جوّيّ واحد (1 atm). وكما هو موضّح في (الشكل 14 – 5)، فإنّ درجة حرارة الثلج كانت ترتفع بمعدل 2 C°/kcal من الحرارة المضافة خلال التسخين حيث: $c \approx 0.50\,\mathrm{kcal/kg\cdot C^\circ}$ [الثلج].

وعندما تصل درجة حرارة الثلج إلى 0°C، فإنّ الارتفاع في درجة حرارة الثلج سيتوقف على الرّغم من عدم توقف كميات الحرارة المضافة إليه. ويبدأ الثلج عندها بالتحوّل التدريجي إلى ماء في الحالة السائلة دون أنْ تتغير درجة حرارته. وبعد إضافة حوالي 40 kcal عند الصفر المئوي، نجد أنّ نصف كمية الثلج قد تحولت إلى ماء، أمّا النصف الآخر فبقي ثلجاً كما هو. وبعد إضافة 80 kcal أو 330 kJ، فإنّ كمية الثلج الكلية تتحول إلى ماء عند درجة الصفر المئوي. إنّ استمرار إضافة الحرارة يعمل على زيادة درجة حرارة الماء، ولكن الآن بمعدل 1 C°/kcal. وعندما تصل درجة الحرارة إلى 100°C، فإنّ أيّ زيادة في مقدار الحرارة تُعدّ عاملاً مساعداً على تغيير طور الماء من السائل إلى الغازي (بخار). ويحتاج 1.0 kg من الماء إلى حوالي 450 lcal (2260 kJ) ليتحوّل بكامله إلى بخار كي يبدأ بعد ذلك المنحنى بالازدياد مرّةً أخرى للدلالة على ارتفاع درجة حرارة البخار نتيجة الاستمرار في إضافة الحرارة.



الشكل 14 – 5 درجة الحرارة بدلالة كمية الحرارة المضافة اللازمة لتحويل 1.0 kg من الثلج عند 40°C– إلى بخار درجة حرارته أعلى من 100°C.



الشكل 14 – 5 درجة الحرارة بدلالة كمية الحرارة المضافة اللازمة لتحويل 1.0 kg من الثلج عند −40°C إلى بخار درجة حرارته أعلى من 100°C.

حرارة الانصهار

حرارة التبخر

الحرارة الكامنة

تُدعى الحرارةُ اللازمة لتحويل 1.0 kg من مادّةٍ من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة حرارةَ الانصهار. ويرمز إليها بـ L_F. تساوي حرارة انصهار الماء 79.7 kcal/kg أو بدلالة الوحدات الدولية (SI) المناسبة $333\ \text{kJ/kg}\ (= 3.33 \times 10^5\ \text{J/kg})$. وتدعى الحرارةُ اللازمة لتحويل مادة ما من الحالة السائلة إلى الغازية **حرارةَ التبخر**، L_V. وبالنسبة إلى الماء فهي 539 kcal/kg أو 2260 kJ/kg. وتتبع المواد الأخرى رسومات بيانية مشابهة (للشّكل 14 – 5) على الرّغم من اختلاف درجة حرارة نقطة الانصهار ودرجة حرارة نقطة الغليان تماماً مثل اختلاف الحرارة النوعية وحرارتي الانصهار والتبخّر. ويبين (الجدول 14 –3) بعض القيم لحرارتي الانصهار والتبخر لعدد من المواد. حيث تدعى كلّ منهما الحرارة الكامنة.

وتُشير حرارتا التبخر والانصهار أيضًا إلى مقدار الحرارة المنبعثة من المادة عندما تتحوّل من الحالة الغازية إلى السائلة، أو من الحالة السائلة إلى الصلبة. وعليه، فإنّ البخار يحرر 2260 kJ/kg عندما يتحول إلى سائل، في حين يُحرِّرُ الماء 333 kJ/kg عندما يصبح ثلجاً.

وتعتمد الحرارة الداخلة في تبدّل الطور على الحرارة الكامنة، بالإضافة إلى الكتلة الكلية للمادة . أيْ أنّ:

تغير الطور أو تبدّله

$$Q = mL \qquad \textbf{(3– 14)}$$

حيث L هي الحرارة الكامنة للعملية المعنية والمادة، أمّا m فهي كتلة المادة، في حين تمثل Q الحرارة المضافة أو المحررة خلال تغير الطور. وعلى سبيل المثال، فعندما يتجمد 5.00 kg من الماء عند درجة حرارة 0°C، فإنّ مقدار الطاقة المحررة: $(5.00\ \text{kg})(3.33 \times 10^5\ \text{J/kg}) = 1.67 \times 10^6\ \text{J}$

جدول (14 – 3) الحرارة الكامنة (عند 1 atm)

المادة	نقطة الانصهار (°C)	حرارة الانصهار kJ/kg	حرارة الانصهار kcal/kg*	نقطة الغليان (°C)	حرارة الغليان kJ/kg	حرارة الغليان kcal/kg*
أكسجين	– 218.8	14	3.3	– 183	210	51
نيتروجين	– 210.0	26	6.1	– 195.8	200	48
كحول إيثيلي	– 114	104	25	78	850	204
أمونيا	– 77.8	33	8.0	– 33.4	137	33
ماء	0	333	79.7	100	2260	539
رصاص	327	25	5.9	1750	870	208
فضة	961	88	21	2193	2300	558
حديد	1808	289	69.1	3023	6340	1520
تنجستن	3410	184	44	5900	4800	1150

*قيم عددية بدلالة kcal/kg وهي نفسها بدلالة cal/g

يحدث أحيانًا تغيّرٌ في الطّور عند إجراء قياساتٍ حراريّةٍ، كما يظهر المثال التالي. وبالفعل فإنّه غالباً ما يتمّ قياس الحرارة الكامنة باستخدام القياسات الحرارية.

المثال 14-7 **صناعة الثّلج.**
ما مقدار الطاقة اللازم طرده بوساطة حجرة التبريد (فريزر) من 1.5 kg من الماء عند درجة الحرارة 20°C لصنع ثلج عند درجة حرارة −12°C؟

النهج: نحتاج إلى حساب الطاقة الكلية المحرّرة عن طريق إضافة الحرارة المنسابة إلى الخارج (1) لخفض درجة حرارة الماء من 20°C إلى 0°C، (2) لتحويل الماء إلى ثلج عند درجة حرارة الصفر المئوي (0°C) (3) لخفض درجة حرارة الثلج من الصفر المئوي إلى 12-°C.

الحـل: كمية الحرارة Q الضروري تحريرها من 1.5 kg من الماء هي :

$$Q = mc_w(20°C - 0°C) + mL_F + mc_{ice}[0° - (-12°C)]$$
$$= (1.5\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(20\,C°) + (1.5\,kg)(3.33 \times 10^5\,J/kg)$$
$$+ (1.5\,kg)(2100\,J/kg\cdot C°)(12\,C°)$$
$$= 6.6 \times 10^5\,J = 660\,kJ$$

المثال 14-8 قدر **هل سينصهر الثلج؟**
تمّ وضع قطعةٍ من الثلج كتلتها 0.50-kg ودرجة حرارتها 10°C-، خلال حفل استقبال في 3.0 kg من الشاي المثلج درجة حرارته 20°C. ما درجة الحرارة النهائية للمزيج؟ وما طوره؟ يمكن اعتبار الشّاي على أنّه ماء، مع إهمال أيّ انسياب حراري للمحيط الخارجي بما فيه الوعاء.

توجيه لحل الأسئلة.
حدّد (أو قدّر) أولاً الحالة النهائية.

النهج: قبل كتابة أيّ معادلة لنطبّق من خلالها حفظ الطاقة، يجب أنْ نحدّد ما إذا كان النظام في حالته النهائية يتكون من الثلج فقط، أم من خليط الماء والثلج، أم من الماء فقط. ولخفض درجة حرارة 3.0 kg من الماء من 20°C إلى 0°C، فإنّ النظام سيحتاج إلى تحرير مقدار من الطاقة يعادل :

$$m_w c_w(20°C - 0°C) = (3.0\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(20\,C°) = 250\,kJ$$

أمّا على الوجه الآخر، فإنّ رفع درجة حرارة الثلج من −10°C إلى 0°C يتطلب:

$$m_{ice}\,c_{ice}[0°C - (-10°C)] = (0.50\,kg)(2100\,J/kg\cdot C°)(10\,C°) = 10.5\,kJ$$

ويتطلب تحويل الثلج إلى ماءٍ عند درجة الصفر المئوي:

$$m_{ice}\,L_F = (0.50\,kg)(333\,kJ/kg) = 167\,kJ$$

ليصبح المجموع الكلي للطاقة: 10.5 kJ + 167 kJ = 177 kJ. وهو مقدار غير كافٍ من الطاقة لخفض درجة حرارة 3.0 kg من الماء من 20°C الـ 0°C. وعليه، فنحن نعلم أنّ المزيج في حالته النهائية سيحتوي على الماء فقط عند درجة حرارة تتراوح بين الصفر المئوي و 20°C.

ثم حدّد درجة الحرارة النهائية.

الحـل: لتحديد درجة الحرارة النهائية T؛ نطبق قانون حفظ الطاقة ونكتب :

كمية الحرارة المفقودة = كمية الحرارة المكتسبة

كمية الحرارة المفقودة اللازمة لتبريد ماء كتلته 3.0 kg من 20°C إلى T.	=	كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 0.50 kg من 0°C إلى T.	+	كمية الحرارة اللازمة لتحويل 0.50 kg من الثلج إلى الماء	+	كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 0.50 kg من الماء من 10°C- إلى 0°C.

وباستخدام بعض النتائج من الأعلى نحصل على:

$$10.5\,kJ + 167\,kJ + (0.50\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(T - 0°C)$$
$$= (3.0\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(20°C - T)$$

وعند الحل لإيجاد T نحصل على:

$$T = 5.0°C$$

التمرين أ: ما مقدار الثلج الإضافي عند −10°C اللازم في (المثال 14 – 8) لخفض درجة حرارة الشّاي إلى 0°C مع صهر الثلج ؟

طريقة حل المسائل **المسعريّة (قياس الحرارة)**

1 .تأكد من وجود معلوماتٍ كافيةٍ لتطبيق قانون حفظ الطاقة. واسأل نفسك: هل النظام معزول (أم معزول إلى درجة كافية للحصول على نتائج جيدة)؟ هل تستطيع حساب المصادر المهمّة جميعها لانتقال الطاقة، أو تعلم عنها؟

2 .طبّق حفظ الطاقة:
الطاقة المفقودة = الطاقة المكتسبة
سيظهر حدّ للحرارة (الطاقة) لأيّ مادة في النظام سواء على يمين هذه المعادلة أو يسارها.
[وكخيار آخر، استخدم $\sum Q = 0$].

3 .إذا لم يحدث تغير للطور، فإنّ كلّ حدّ في معادلة حفظ الطاقة (في الأعلى) سيبدو كالتالي :

$$Q\ (\text{المكتسبة}) = mc(T_f - T_i)$$

أو:

$$Q\ (\text{المفقودة}) = mc(T_i - T_f)$$

حيث تمثل T_i و T_f درجتي الحرارة الابتدائية والنهائية للمادة، أمّا m و c فهما الكتلة والحرارة النوعية على الترتيب.

4 .إذا تغير الطور أو كان هناك احتمال لتغيره، فسنجد حدوداً في معادلة حفظ الطاقة مثل $Q = mL$ حيث L هي الحرارة الكامنة. ولكن قبل تطبيق حفظ الطاقة يجب أنْ نحدّد (أو نقدّر) حالة النظام النهائية كما رأينا في (المثال 14 – 8) عن طريق حساب قيم المساهمات المختلفة للحرارة Q.

5 .تأكّدْ من ظهور كلّ حدٍّ على الجانب الصحيح لمعادلة الطاقة (الحرارة المكتسبة أو المفقودة). وأنّ ΔT كلّها موجبة.

6 .لاحظ. عندما يصل النظام إلى الاتزان الحراريّ فإنّ درجة الحرارة النهائية للمواد جميعها هي نفسها. لتكون هناك قيمة وحيدة T_f.

7 .حلّ معادلة الطاقة لإيجاد المجهول.

مثال 14-9 **تحديد الطاقة الكامنة.**

إنّ الحرارة النوعية للزئبق السائل هي $140\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ$. عند وضع $1.0\ \text{kg}$ من زئبق سائل درجة حرارته -39°C في مسعرٍ حراريٍّ من الألنيوم كتلته 0.50-kg، ويحتوي على $1.2\ \text{kg}$ من ماء درجة حرارته 20.0°C وُجد أنّ درجة حرارة المزيج 16.5°C. فما حرارة انصهار الزئبق بدلالة J/kg؟

النّهج: سنتبع طريقة حلّ المسائل خطوة خطوة.

الحــلّ:

1. هل النظام معزول؟ وضع الزئبق في المسعر الحراري وهو بالتعريف معزول جيداً. ونظامنا المعزول هو المسعر الحراري، والماء، والزئبق.

2. حفظ الطاقة. الحرارة التي يكتسبها الزئبق = الحرارة التي يفقدها الماء والمسعر الحراري.

3. و 4. تغير الأطوار. هناك تغيرٌ في الطّور. بالإضافة إلى ذلك، فنحن نستخدم معادلات الحرارة النوعية. تحتوي الحرارة التي يكتسبها الزئبق (Hg) على حدّ يمثل انصهار الزئبق :

$$Q\ (\text{انصهار الزئبق الصلب}) = m_{Hg}\, L_{Hg}$$

بالإضافة إلى حدّ يمثل تسخين الزئبق السائل من درجة حرارة -39°C إلى $+16.5^\circ\text{C}$:

$$Q(\text{تسخين الزئبق السائل}) = m_{Hg}\, c_{Hg}[16.5^\circ\text{C} - (-39^\circ\text{C})]$$
$$= (1.0\ \text{kg})(140\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(55.5\ \text{C}^\circ) = 7770\ \text{J}$$

إن مصدر الطاقة التي اكتسبها الزئبق هو الماء والمسعر الحراري. ولتنخفض درجة حرارتيهما بعد ذلك:

$$Q_{cal} + Q_{H_2O} = m_{cal}c_{cal}(20.0^\circ\text{C} - 16.5^\circ\text{C}) + m_{H_2O}c_{H_2O}(20.0^\circ\text{C} - 16.5^\circ\text{C})$$
$$= (0.50\ \text{kg})(900\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(3.5\ \text{C}^\circ) + (1.2\ \text{kg})(4186\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(3.5\ \text{C}^\circ)$$
$$= 19{,}200\ \text{J}$$

5. معادلة الطاقة. تخبرنا معادلة الطاقة أنّ الحرارة المفقودة من الماء وكوب المسعر الحراري يجب أن تعادل الحرارة التي يكتسبهاالزئبق:

$$Q_{cal} + Q_{H_2O} = Q\ (\text{الزئبق الصلب المنصهر}) + Q(\text{حرارة الزئبق السائل})$$

أو:

$$19{,}200\ \text{J} = m_{Hg}\, L_{Hg} + 7770\ \text{J}$$

6. درجة حرارة الاتزان. لقد أعطيت، وهي 16.5°C، وقد استخدمناها فعليًّا.

7. حلّ. إنّ المجهول في معادلة الطاقة (نقطة 5) هو L_{Hg} حرارة انصهار الزئبق الكامنة. ونحلّ المعادلة لإيجادها ونعوّض $m_{Hg} = 1.0\ kg$:

$$L_{Hg} = \frac{19{,}200\ J - 7770\ J}{1.0\ kg} = 11{,}400\ J/kg \approx 11\ kJ/kg$$

حيث قربنا النتيجة النهائية إلى رقمين مميزين.

التبخّـر

تُعدّ الحرارة الكامنة ضروريّة، لتحويل السائل إلى غاز. وهذا لا يحدث عند نقطة الغليان فقط . يستطيع الماء تغيير طوره من سائل إلى غاز حتى عند درجة حرارة الغرفة. ويطلق مفهوم التبخرعلى هذه العملية (انظر أيضًا البند 13 – 13). وتزداد قيمة حرارة تبخر الماء قليلاً مع انخفاض درجة الحرارة. وعلى سبيل المثال. فهي 2450 kJ/kg (585 kcal/kg) عند درجة حرارة 20°C مقارنةً مع 2260 kJ/kg (= 539 kcal/kg) عند درجة حرارة 100°C. وعندما يتبخر الماء. يبرد ما تبقى من السائل؛ لأنّ الطاقة الضرورية (حرارة التبخر الكامنة) تأتي من الماء نفسه. وعليه. فإنّ الطاقة الداخلية- وبالتالي درجة الحرارة -يجب أن تنخفض.*

تطبيق الفيزياء
درجة حرارة الجسم

ويعدّ تبخر الماء من جلد الإنسان أحد أهم الطرق الذي يستخدمها الجسم للتحكم في درجة حرارته . وعندما ترتفع درجة حرارة الجسم قليلاً عن المعدل الطبيعي. فإنّ منطقة قياس الحرارة في الدماغ تتحسس هذه الزيادة في درجة الحرارة. وترسل إشارة إلى الغدد العرقية لزيادة إنتاجها. وتأتي الطاقة (الحرارة الكامنة) الضرورية لتبخير هذا الماء من الجسم ليبرد الجسم نتيجة ذلك.

النظرية الحركية للحرارة الكامنة

نستطيع الاستفادة من النظرية الحركية لمعرفة سبب حاجتنا إلى طاقة لصهر المادة وتبخيرها. إنّ حرارة الانصهار الكامنة عند نقطة الانصهار لا تعمل على زيادة متوسط الطاقة الحركية (ودرجة الحرارة) لجزيئات المادة الصلبة. بل تستخدم للتغلب على طاقة الوضع التي تربط الجزيئات بعضها ببعض. أيْ أنّه يجب بذل شغل ضد قوى التجاذب هذه لتحرير الجزيئات من مواضعها في المادة الصلبة الثابتة نسبياً. فتصبح قادرة على الانتقال من موضع إلى آخر في الحالة السائلة. وبشكل مشابه. فإنّ الطاقة ضرورية لجزيئات السائل القريبة من بعضها بعضًا للهروب إلى الحالة الغازية . وتعدّ هذه العملية إعادة ترتيب عنيفة للجزيئات مقارنة بتلك التي في حالة الانصهار (ليزداد متوسط المسافة الفاصلة بين الجزيئات بشكل كبير). وبالتالي. فإنّ حرارة التبخر لمادة ما أكبر بكثيرٍ من حرارة انصهارها بشكل عام.

6-14 انتقال الطاقة : التوصيل

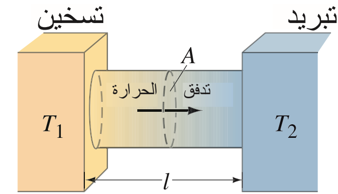
ثلاث طرق لانتقال الحرارة

يحدث انتقال الطاقة من مكان. أو من جسم إلى آخر بثلاث طرائق مختلفة هي: التوصيل والحمل والإشعاع. وسنناقش الآن كلًّا من هذه الحالات الثلاث منفردة وعلى الترتيب. على الرّغم من أنّه في الحياة العملية قد يحدث انتقال للطاقة بطريقتين أو حتى بالطرائق الثلاث مجتمعة في آن واحد . وسنتناول في هذا الجزء طريقة التوصيل.

عندما يُوضع محراك الحجر الفلزي في نار موقدة. أو ملعقة فضة في صحن حساء ساخن. فإنّ الطرف الآخر الذي تمسكه بيدك سيصبح ساخناً أيضاً على الرّغم من عدم ملامسته مصدر الحرارة مباشرةً . ونعبّر عن ذلك بأنّ الحرارة وصلت من الطرف الساخن إلى الطرف البارد.

ويمكن تخيل انتقال الحرارة بالتوصيل في مواد كثيرة من خلال تصادمات الجزيئات. فعندما يتمّ تسخين أحد طرفي جسم ما. تبدأ جزيئات هذا الطرف بالتحرك أسرع وأسرع. وعند اصطدام هذه الجزيئات مع الجزيئات الأخرى المجاورة. بطيئة الحركة. ينتقل جزء من الطاقة الحركية لتلك الجزيئات لتبدأ سرعتها بالازدياد. ومن ثمّ تقوم هذه الجزيئات بنقل جزء من طاقتها عن طريق التصادم إلى الجزيئات الأبعد على امتداد الجسم. وعليه. فإن الطاقة الحركية للحركة الحرارية تكون قد انتقلت خلال الجسم. أمّا في الفلزات. وبحسب النظرية الحديثة. فإنّ تصادمات الإلكترونات الحرة داخل الفلز يمكن تخيلها على أنّها السبب الرئيس المسؤول عن التوصيل.

* وبناءً على النظرية الحركية. فإنّ التبخّر هو عملية تبريد؛ لأنّ الجزيئات المتحركة الأسرع هي القادرة على الهروب من السطح (البند 13 – 13). وبالتالي. فإن متوسط سرعة الجزيئات المتبقية ستصبح أقل. وكنتيجة (للمعادلة 13 – 8) فإنّ درجة الحرارة ستصبح أقل أيضًا.



الشكل 14 - 6 التوصيل بين منطقتين عند درجتي حرارة T_1 و T_2. وإذا كانت T_1 أكبر من T_2، فإن الحرارة ستنساب إلى اليمين. ويعطى المعدل (بالمعادلة 14 - 4).

يحدث التوصيل الحراري بين نقطتين فقط إذا كان هناك اختلاف في درجة الحرارة بين هاتين النقطتين. وفي الحقيقة، فإنّ معدّل انسياب الحرارة خلال المادة يتناسب طرديًّا مع الفرق في درجة الحرارة بين طرفيها (نهايتيها) . كما يعتمد معدّل انسياب الحرارة على شكل الجسم وحجمه. ولنقم الآن بدراسة كمية للموضوع. فنأخذ بالحسبان انسياب الحرارة خلال أسطوانة متجانسة كما هو موضح في (الشكل 14 – 6). لقد وجد عمليًّا أنّ انسياب الحرارة Q خلال فترة زمنية t يعطى بالعلاقة:

$$\frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{l} \qquad \textbf{(4 – 14)}$$

حيث A هي مساحة مقطع الجسم العمودية، أمّا l فهي المسافة الفاصلة بين طرفيه، علمًا بأنّ درجة حرارة أحد الطرفين هي T_1 ودرجة حرارةالطرف الآخر T_2 و k معامل التناسب الذي يدعى الموصلية الحرارية وهو مميز لنوع المادة. ومن (المعادلة 14–4) نرى أن معدل انسياب الحرارة (ووحداتها J/s) يتناسب طرديا مع مساحة مقطع الجسم العمودية ومع انحدار درجات الحرارة $(T_1-T_2)/l$.*

ويعرض (الجدول 14 – 4) الموصلية الحرارية k لمجموعة منوعة من المواد. والمواد التي لها k مرتفعة توصل الحرارة بسرعة، ويُقال بأنّها موصلات جيدة. وتقع معظم الفلزات ضمن هذه الفئة على الرّغم من وجود فروقات واسعة بينها.ويمكن ملاحظة ذلك بسهولة عند مسك ملعقتين: إحداهما مصنوعة من الفضة والأخرى مصنوعة من الفولاذ عديم الصدأ مغموستين في قدر الحساء نفسه. وتُعدّ المواد ذات الموصلية الحرارية k المنخفضة مثل الصوف، والليف الزجاجي، وبولي يوريثان، و ريش الأوزة موصلات رديئة للحرارة. لذا، فهي عوازل جيدة. وتستطيع قيم k النسبية تفسير الظواهر البسيطة كشعور أقدامنا بالدفء عند المشي على سجادة صوفية أكثر من شعورنا بالدفء إذا سرنا على أرض مبلطة وغير مغطاة؛ وسبب هذا هو أنّ البلاط موصل للحرارة بشكل أفضل من السجاد، وعندما تنساب الحرارة من القدم إلى السجادة، فلن تستطيع قطعة السجاد التخلص منها بسرعة كافية، مما يدفع السجادة إلى الاحتفاظ بالحرارة المنسابة إليها من القدم. ومن هنا، يحصل اتزان حراري سريع بين القدم وقطعة السجاد مما يعطينا شعورًا بالدفء. أمّا البلاط فهو مصنوع من مادة ذات توصيلٍ جيّدٍ يساعد على التخلّص من الحرارة المنسابة من القدم بسرعة لتُرغَم القدم على خسارة مقدارٍ آخر من (الطاقة) الحرارة بسرعة، فتشعر القدم نتيجة ذلك بانخفاض درجة حرارتها.

معدل انسياب الحرارة بوساطة التوصيل

الجدول (14 – 4)
الموصلية الحرارية

المادة	الموصلية الحرارية، k kcal (s·m·C°)	J (s·m·C°)
فضة	10×10^{-2}	420
نحاس	9.2×10^{-2}	380
ألمنيوم	5.0×10^{-2}	200
فولاذ	1.1×10^{-2}	40
ثلج	5×10^{-4}	2
زجاج	2.0×10^{-4}	0.84
طوب	2.0×10^{-4}	0.84
خرسانة	2.0×10^{-4}	0.84
ماء	1.4×10^{-4}	0.56
غشاء بشري	0.5×10^{-4}	0.2
خشب	0.3×10^{-4}	0.1
ليف زجاجي	0.12×10^{-4}	0.048
فلين	0.1×10^{-4}	0.042
صوف	0.1×10^{-4}	0.040
ريش وز	0.06×10^{-4}	0.025
بولي يورثين	0.06×10^{-4}	0.024
هواء	0.055×10^{-4}	0 023

لماذا نشعر بأن السجاد اكثر دفئًا من البلاط؟

المثال 14-10 الحرارة المفقودة من خلال النوافذ.

تطبيق الفيزياء
الحرارة المفقودة من خلال النوافذ

تُعدّ النوافذ سببًا رئيسًا لفقد الحرارة من البيت. احسب معدل انسياب الحرارة خلال زجاج نافذة مساحتها $1.5\ \text{m} \times 2.0\ \text{m}$ وسمكها $3.2\ \text{mm}$ إذا كانت درجتا الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي لزجاج النافذة هما $15.0°\text{C}$ و $14.0°\text{C}$ على الترتيب (الشكل 14 – 7).

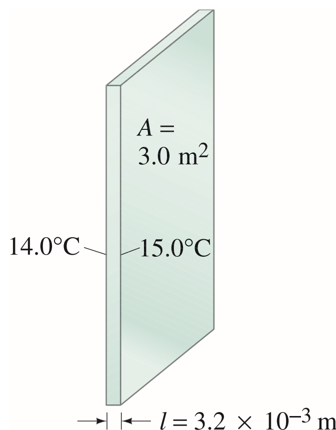
النهج: تنساب الحرارة عن طريق التوصيل خلال زجاج سمكه $3.2\ \text{mm}$ من درجة الحرارة المرتفعة الداخلية إلى درجة الحرارة المنخفضة الخارجية. ونستخدم معادلة التوصيل الحراري (14 – 4).

الحـل: المساحة $A = (2.0\ \text{m})(1.5\ \text{m}) = 3.0\ \text{m}^2$ والسمك $l = 3.2 \times 10^{-3}\ \text{m}$. وباستخدام (الجدول 14 – 4) لإيجاد k، نحصل على:

$$\frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{(0.84\ \text{J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{C°})(3.0\ \text{m}^2)(15.0°\text{C} - 14.0°\text{C})}{(3.2 \times 10^{-3}\ \text{m})}$$
$$= 790\ \text{J/s}$$

ملحوظة: يعادل معدل انسياب الحرارة هذا:
$(790\ \text{J/s})/(4.19 \times 10^3\ \text{J/kcal}) = (0.19\ \text{kcal/s})$ أو
$(0.19\ \text{kcal/s}) \times (3600\ \text{s/h}) = 680\ \text{k cal/h}.$

الشكل 14 – 7 (المثال 14 - 10).



* تشابه (معادلة 14 – 4) تماماً العلاقات التي تصف الانتشار (البند 13 –14) وانسياب السوائل خلال أنبوب (البند 10 – 12). وفي هذه الحالات، وُجد أن انسياب المادة يتناسب طرديًّا مع انحدار التركيز $(C_1 - C_2)/l$ أو مع انحدار الضغط $(P_1 - P_2)/l$. وهذا التشابه القريب هو ما يجعلنا نتكلم عن "انسياب" الحرارة. ومع هذا، فيجب أن نتذكر دائمًا عدم وجود مادّةٍ تنساب بهذه الطريقة. وفي الحقيقة، فإن الطاقة هي التي انتقلت.

وربّما تلاحظ كما في (المثال 14 – 10) أن $15°C$ لا تمنح الدفء الكافي لغرفة المعيشة في البيت. وقد تكون الغرفة ذاتها أكثر دفئاً من ذلك. وربّما يكون محيطها الخارجي أكثر برودة من $14°C$. إنّ درجتي الحرارة $15°C$ و $14°C$ هما الدرجتان اللتان تم تحديدهما بجانب سطحي النافذة مباشرة. مع احتمال انخفاض درجة الحرارة إلى هاتين القيمتين فقط بالقرب من النافذة. أي أنّ طبقة الهواء بجوار النافذة سواءً من الداخل أو الخارج تعمل كعازل. وأنّ الانخفاض الأعظم في درجات الحرارة- في معظم الأحيان- يحدث خلال طبقة الهواء هذه بالقرب من النافذة. وإذا كانت الرياح شديدةً. فإنّ الهواء خارج النافذة سيحل محلّه هواء بارد باستمرار ليصبح عندها الانحدار في درجة الحرارة خلال زجاج النافذة أعلى. مّما يترتّب على ذلك معدل فقدان كبير للحرارة. وعند زيادة سمك طبقة الهواء عن طريق استخدام لوحين من الزجاج تفصل بينهما فجوة هوائية فإنّ كمية الحرارة المفقودة ستقل مقارنة مع تلك الحالة التي يتم فيها زيادة سمك الزجاج فقط. وتعدّ هذه النتيجة الحتمية هبة من الله بأن جعل التوصيل الحراري للهواء أقلّ منه للزجاج.

تستطيع الريح أن تسبب فقدانا هائلا للحرارة

تطبيق الفيزياء
النوافذ الحرارية

تطبيق الفيزياء
تعمل الثياب على العزل عن طريق احتباس طبقة من الهواء في ثناياها

وأمّا صفات عزل الملابس. فتأتي من خاصية العزل للهواء. وستعتمد أجسادنا بلا ملابس على تسخين الهواء الملامس لسطح جلدنا ليصبح أكثر ملاءمة لأنّ الهواء عازل جيد. ولكن بما أنّ الهواء متحرك. فقد يهب على شكل نسمات أو أعاصير. إضافةً إلى أن الناس لا يبقون ساكنين في مواضعهم. بل يتحركون. لذا. فإنّ الهواء الساخن غالباً ما يتبدل بهواء بارد ليزداد فرق الطاقة والحرارة المفقودة من الجسم البشري. وتبقينا الملابس دافئين عن طريق حصرها طبقة من الهواء الذي لا يعود قادراً على الحركة. وأخيراً. فليست الملابس هي التي تعمل على عزلنا ولكن السبب في ذلك هو طبقة الهواء التي تحصرها ملابسنا. ويعدّ ريش الإوزة عازلاً جيداً حيث إن نفش كمية قليلة جداً منه قادرة على حصر كمية كبيرة من الهواء.

التمرين ب: وضِّحْ لماذا تقلل الستائر المسدلة على النوافذ من مقدار الحرارة المفقودة من البيت.

قيم R لمواد البناء

تطبيق الفيزياء
قيم R للعزل الحراري

يتمُّ غالباً تحديد الصفات الحرارية لمواد البناء عن طريق إعطائها قيماً "للمقاومة الحرارية" R وخصوصاً عند معاملة هذه المواد كعوازل. وتُعرَّفُ R لمادة سمكها l حسب المعادلة التالية :

$$R = \frac{l}{k}$$

وتجمع قيمة R لعينة من مادة ما سمك العينة l وموصليتها الحرارية k في رقم واحد. وتُعطى قيم R في الولايات المتحدة الأمريكية بالوحدات البريطانية $ft^2.h.F°/Btu$ (وعلى سبيل المثال. تعني R–19 أن: $R = 19\ ft^2{\cdot}h{\cdot}F°/Btu$. ويعطي (الجدول 14 – 5) قيم R لبعض مواد البناء العامة: ولاحظ أن قيم R تزداد طردياً مع سمك المادة. وكمثال على ذلك. فإن إنشين من الزجاج الليفي هو R–6 ونصف ذلك لأربعة إنشات $= R$–12. انظر الجدول (14 – 5).

الجدول (14 – 5) قيم I

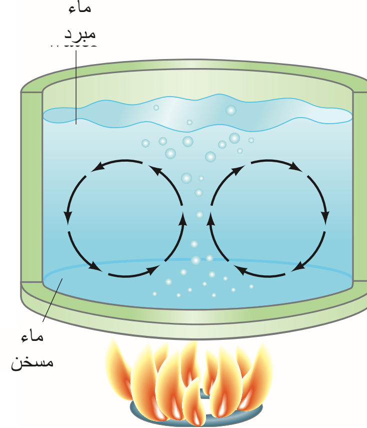
المادة	السمك	قيمة -R
زجاج	$\frac{1}{8}$ إنش	1
طوب	$3\frac{1}{2}$ إنش	0.6 - 1
خشب رقائقي	$\frac{1}{2}$ إنش	0.6
عازل ليفي زجاجي	4 إنش	12

7-14 انتقال الحرارة : الحمل

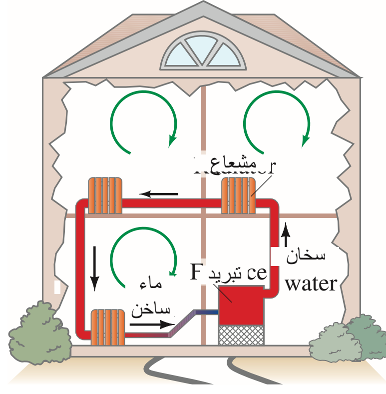
على الرّغم من أنّ السوائل والغازات موصلات غير جيدة للحرارة بشكل عام. إلا أنّها لا تزال قادرةً على نقل الحرارة بسرعةٍ فاعلةٍ عن طريق الحمل. والحمل هو عمليّةُ انسياب الحرارة بوساطة حركة الجزيئات من موضع إلى آخر. وفي حين يتضمن التوصيل حركة الجزيئات (و/أو الإلكترونات) إلى مسافات قريبة فقط لتتصادم بعد ذلك. فإنّ الحمل يتضمّن حركة عدد هائل من الجزيئات إلى مسافات بعيدة.

ويعدّ فرن الهواء—القسري مثالاً على الحمل القسري؛ حيث يتم تسخين الهواء داخل الفرن ومن ثم ينفخ هذا الهواء بوساطة مروحة إلى داخل الغرفة. ويحدث الحمل في الطبيعةأيضًا. ومن الأمثلة المألوفة على ذلك ارتفاع الهواء الساخن إلى الأعلى. فإذا نظرنا لوهلة لما يحدث للهواء المجاور للمشعاع الحراري (أو أي سخان) فنجد أن الهواء أعلى (فوق) المشعاع يتمدد نتيجة لارتفاع درجة حرارته (الفصل الثالث عشر) وتقل كثافته نتيجةً لذلك. وعندما تصبح كثافته أقلّ من كثافة الهواء البارد في الجوار. فإنّه يرتفع إلى الأعلى تماماً مثل قطعة الخشب المغمورة في الماء التي تطفو إلى الأعلى بسبب كثافتها المنخفضة مقارنة بكثافة الماء. وتمثّل تيارات المحيط الدافئة والباردة مثل تيار الخليج المنعش حملاً طبيعياً على المستوى العالمي. كما أنّ الريح مثالاً آخر على الحمل أيضاً. وبشكل عام. فإنّ الطقس ما هو إلّا نتيجة لتيارات الهواء الحمليّة.

تطبيق الفيزياء
تيارات المحيط ورياحه



الشكل 14 – 8 تيارات الحمل الحراري في وعاء ماء يسخن فوق موقد.



الشكل 14 – 9 يقوم الحمل الحراري في وعاء ماء يسخن فوق موقد بدور في تدفئة المنزل. تظهر الأسهم الدائرية

عندما يتمّ تسخين وعاءٍ مليءٍ بالماء (الشكل 14 – 8) تتكوّن تياراتُ حملٍ حراريٍّ نظرًا لارتفاع المياه الساخنة من قعر الوعاء إلى الأعلى بسبب كثافتها المتناقصة. ويتمّ تعويض الماء الساخن بوساطة الماء البارد من الأعلى. ويستخدم هذا المبدأ في أنظمة تدفئة عديدة مثل نظام مشعاع الماء الساخن المبين في (الشكل 14 –9). يتمّ تسخين الماء في الفرن. فترتفع درجة حرارته. فيتمدد ويرتفع إلى الأعلى كما هو مبين. وهذا هو سبب دوران الماء في نظام التدفئة. ويدخل الماء الساخن إلى المشعاع. فتنتقل الحرارة عن طريق التوصيل الحراري إلى الهواء ليعود بعدها الماء البارد إلى الفرن. وعليه. تستمر المياه في الدوران بسبب الحمل الحراري. وتستخدم المضخات أحيانا لرفع كفاءة الدورة. ويصبح الهواء داخل الغرفة كلّه ساخنًا أيضًا بسبب الحمل الحراري. كما هو مبيّن بالأسهم الخضراء في (الشكل 14 – 9).

وتعتمد أشكال أخرى للمواقد على الحمل الحراري. ولا تملك أفران الهواء الساخن ذات فتحات التهوية السفلية على مراوح. ولكنّها تعتمد على تيارات الحمل الحراري الطبيعي الكبيرة. وتستخدم المراوح في أنظمة أخرى. ومن المهمّ جدًّا في الحالتين أن يكون الهواء البارد قادرًا على العودة إلى الفرن لتستطيع تيارات الحمل الحراري الدوران خلال الغرفة للعمل على توزيع الحرارة داخلها بانتظام.

ومثال آخر على الحمل الحراري وتأثيره نأخذه من مشهد من "رياح وادي يوسيميتي"والذي حرره أحد علماء البيئة الأوائل "فرانسو ماتيس" حيث قال:

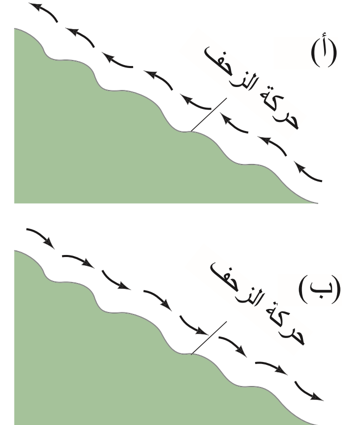
لقد عمدت الطبيعة على تسخين الأرض بسرعة أكبر من تسخينها للهواء. ولتصبح كلّ تلة منحدرة تتعرض لشمس الصباح بعد وقت قليل مصدرًا للحرارة. ولتبدأ على الفوربتسخين الهواء فوقها فيصبح أكثر خفةً ويبدأ بالارتفاع. ولكنّه لن يرتفع رأسيًّا إلى الأعلى لوجود طبقةٍ من الهواء البارد فوقه مباشرةً تعمل على ضغط الهواء الساخن نحو الأسفل. وليبدأ الهواء الساخن بالارتفاع بعد ذلك بالقرب من سطح المنحدر الدافئ كما هو مبيّن بالأسهم في المخطط المصاحب (شكل 14 – 10أ). ولا يمكن لزائري الوادي -على قلتهم- إلا أن يتذكروا معاناتهم الكبيرة خلال تسلقهم الطرق المتعرجة وغير المنتهية إلى الأعلى في يومٍ حار. وأنفاسهم متقطعة. والشمس تلسع ظهورهم. وسحب غبارهم تسابقهم نحو الأعلى بطريقة خانقة ومثيرة للغضب الشديد . وربّما ظنّوا في حينها أنّ ما يحدث ببساطة ما هو إلّا نتيجة حظّهم العاثر الذي جعل الغبار يرتفع معهم إلى الأعلى في ذلك اليوم تحديداً. ولكن. هذا ما يحدث دائمًا فوق أيّ منحدرٍ عملت الشمس على تدفئته.

وقد تعود كذلك الذكريات في مناسبةٍ أخرى ناجمة عن مصاحبة غيمة من الغبار للرحالة الذين كانوا يسرعون بالنزول عن المنحدر لتهبّ عليهم ريحٌ مغبّرةٌ شديدة، فتتبعهم من طريق متعرج إلى آخر. وكأنّها تتعمد ذلك باستمتاع ماكر. ويحدث هذا بما لا يدع مجالاً للشك على الجانب الآخر للمنحدر في المنطقة المظلمة من الوادي. حيث تنعكس الظروف الجوية هناك تماماً. فعندما تغادر الشمس المنحدر. تبدأ الأرض بفقدان حرارتها عن طريق الإشعاع. وتغدو درجة حرارتها أقل من درجة حرارة الهواء بسرعة كبيرة. وتنخفض درجة حرارة طبقة الهواء الملامسة لسطح الأرض تدريجياً لتصبح أثقل عند تكاثفها. وتبدأ بالزحف نحو أسفل المنحدر (شكل 14 – 10ب). وعليه. فمن الطبيعي

تطبيق الفيزياء
تدفئة المنزل بوساطة الحمل الحراري

تطبيق الفيزياء
الحمل الحراري فوق مسار تنزه شديد الانحدار

الشكل 14 –10 الحمل الحراري فوق مسار تنزه: (أ) حركة الهواء في الصباح إلى الأعلى بسبب تسخينه. و (ب) حركة الهواء في المساء إلى الأسفل بسبب تبريده.



حصول زحف دافئ إلى الأعلى على الجانب المضاء للمنحدر، وكذلك زحف نحو الأسفل على جانب المنحدر المظلم –ويمكن الاعتماد على هذا القانون تقريباً في أي يوم في المناطق التي لا تهب فيها الريح مثل منطقة اليوسيميتي. وتعدّ هذه الحقيقة مفيدة لشخص يخطط لرحلة، فيستفيد منها لتكون رحلته خالية تماماً من الغبار.

تطبيق الفيزياء
حرارة الجسم:
الحمل الحراري بوساطة الدم

إنّ الجسم البشري يولّد كمية هائلة من الطاقة الحرارية. ويستغل الجسم البشري عند أقصى حدٍّ فقط 20% من طاقة الطعام المتحولة داخله في عمل شغل. في حين يظهر ما يربو على 80% من طاقة الطعام المتحولة على شكل طاقة حرارية. وخلال النشاطات الخفيفة، على سبيل المثال، إذا لم يبدد الجسم هذه الطاقة الحرارية، فإن درجة حرارة الجسم سترتفع بمقدار 3C° خلال كل ساعة. لذا، من الطبيعي أن يتخلص الجسم من هذه الطاقة أو الحرارة نحو الخارج. فهل ستنتقل الحرارة عن طريق التوصيل؟ إن درجة حرارة جلد الإنسان في الوضع الطبيعي تتراوح ما بين 33°C إلى 35°C، في حين تكون درجة حرارة الجسم الداخلية 37°C . وتظهر الحسابات البسيطة (انظر المسألة 55) أنه بسبب هذا الاختلاف البسيط في درجات الحرارة، بالإضافة إلى الموصلية الحرارية المنخفضة للأنسجة، فإن التوصيل الحراري المباشر مسؤول عن فقدان جزء بسيط من الطاقة الحرارية الواجب التخلص منها. وبدلاً من ذلك، فإن الحرارة تنقل إلى السطح بوساطة الدم. فبالإضافة إلى الوظائف الأخرى المهمة للدم جميعها، فإنه يعمل وكأنه سائل حمل ينقل الحرارة إلى أسفل سطح الجلد مباشرة. وهو بذلك يوصل الحرارة للسطح (خلال مسافة قصيرة جدًّا). وعندما تصبح الحرارة على السطح، فإنّها تنتقل إلى المحيط الخارجي عن طريق كلٍّ من الحمل الحراري، والتبخير، والإشعاع (انظر البند 14 – 8).

8-14 انتقال الحرارة: الإشعاع

يتطلب كلٌّ من التوصيل الحراري والحمل الحراري وجود وسط مادي لحمل الحرارة من المنطقة الساخنة إلى المنطقة الباردة. ولكن هناك نوع آخر من انتقال الحرارة يحدث دون وجود أي وسط مادي نهائياً؛ فأنواع الحياة على الأرض جميعها تعتمد على انتقال الطاقة من الشمس إلى الأرض خلال الفراغ الكامل (تقريباً). وهذا الشكل من انتقال الطاقة عبارة عن حرارة؛ لأن درجة حرارة سطح الشمس أعلى بكثير (6000 K) من درجة حرارة سطح الأرض. وتسمّى هذه الطريقة الإشعاع (شكل 14 – 11). إنّ الدفء الذي يصلنا من النار هو طاقة مشعة غالبًا. (ومعظم الهواء الذي يسخن بوساطة النار من مدفئة الحطب يرتفع عن طريق الحمل الحراري نحو أعلى المدخنة ولايصلنا).


الشكل 14 – 11 قطر سطح الشمس 6000 K أكبر من سطح الكرة الأرضية

وكما سنرى في الفصول القادمة، فإنّ الأشعة تتألف من أمواج كهرومغناطيسية. ويكفينا الآن القول بأنّ الأشعة التي تصلنا من الشمس تتكوّن من الضوء المرئي بالإضافة إلى أطوال موجية أخرى كثيرة لا تكون العين البشرية حسّاسة لها، ومن ضمنها الأشعة تحت الحمراء (IR) التي تُعدّ المسؤولة الرئيسة عن تسخين الأرض.

ولقد وجد أن المعدّل الذي تتبعه الأجسام لإشعاع الطاقة يتناسب طرديًّا مع الأسّ الرابع لدرجة الحرارة T بالكلفن. أي أنّ جسماً ما عند 2000 K يشع بمعدل أكبر مقداره $2^4 = 16$ ضعفاً مقارنةً مع جسمٍ آخر عند 1000 K. ويتناسب معدّلُ الإشعاع أيضاً مع مساحة الجسم الباعث A. وعليه، فإنّ معدّل خروج الطاقة من الجسم هو $\Delta Q/\Delta t$:

الاشعاع $\propto T^4$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A T^4 \qquad (5-14)$$

وتُدعى هذه **معادلة ستيفن – بولتزمان**. وσ هي ثابت كوني يُسَمّى **ثابت ستيفن – بولتزمان** وله قيمة :

اشعاعية ثابت بولتزمان

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4}$$

ويُسَمّى المعامل e الانبعاثية، وهو رقم بين 0 و 1، وهو مميز لسطح المادة المشعة. وتُعادل انبعاثية السطوح السود مثل الفحم الحجري 1، أمّا انبعاثية سطوح الفلزات اللامعة فتقترب من الصفر. وعليه، فهي تبعث إشعاعات أقلّ بسبب ذلك. وتعتمد قيمة e -إلى درجة ما- على درجة حرارة الجسم. إنّ السطوح اللامعة لا تبعث الإشعاعات بمقدار ضئيل جداً فقط ولكنّها لا تمتصّ منها أيضًا إلّا القليل جداً (وتعكس معظمها). أمّا الأجسام الدكناء والسود على الوجه الآخر، فتمتصُّ معظم الطاقة الساقطة عليها تقريباً. وهذا هو السبب الذي يفضل لأجله ارتداء الملابس فاتحة اللون في الأيام الحارة مقارنة بالملابس الدكناء. وعليه، **يعدّ الماص الجيد للحرارة باعثًا جيّدًا أيضًا.**

تطبيق الفيزياء
الملابس الداكنة مقابل الملابس الفاتحة

المادة الماصة الجيدة هي مادة مشعة جيدة

والأجسام لا تبعث الطاقة فقط عن طريق الاشعاع، بل تمتصُّ الطاقة من الأجسام الأخرى؛ فإذا كانت الانبعاثية لجسم ما هي e ومساحته A، وهو عند درجة حرارة T_1، فإنّه سيشع الطاقة بمعدّل $e\sigma AT_1^4$. وإذا كان الجسم محاطاً ببيئةٍ عند درجة حرارة T_2، فإنّ معدّل إشعاع محيطه الخارجي للطاقة سيتناسب مع T_2^4، في حين سيتناسب معدّل امتصاصه للطاقة من محيطه الخارجي مع T_2^4 أيضاً. لذا، فإنّ محصّلة معدّل انسياب إشعاع الحرارة من الجسم سيخضع للمعادلة التالية

محصلة معدل انسياب الإشعاع الحراري

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A(T_1^4 - T_2^4) \qquad (6-14)$$

حيث تمثّل A مساحة سطح الجسم، أمّا T_1 فدرجة حرارته، و e هي انبعاثيته (عند درجة حرارة T_1) في حين تمثل T_2 درجة حرارة محيطه الخارجي. لاحظ أنّ معدل امتصاص الحرارة بوساطة الجسم في هذه المعادلة هو $e\sigma AT_2^4$. أي أن معامل التناسب هو نفسه لعمليتي الامتصاص والانبعاث. ويجب أن يكون هذا صحيحاً ليتطابق مع الحقيقة العملية التي تشير إلى أنّ الاتزان بين الجسم ومحيطه الخارجي يتحقق عندما يصلان إلى درجة الحرارة نفسها. أي أنّ $\Delta Q/\Delta t$ يجب أنّ تعادل الصفر عند $T_1 = T_2$. وعليه، فإنّ معاملات حدود الامتصاص والانبعاث يجب أن تتساوى. وهذا يؤكّد أنّ المشعّ الجيّد ماصٌّ جيّدٌ.

وبسبب إشعاع الجسم ومحيطه الخارجي للطاقة، فإنّه يترتب على ذلك انتقال الطاقة من جسم إلى آخر إلاّ إذا كانت درجة حرارة الجسمين هي نفسها. ومن (المعادلة $14-6$)، فإنّه من الواضح إذا كانت $T_1 > T_2$ فإنّ محصّلة انسياب الحرارة ستكون من الجسم إلى محيطه الخارجي ليبرد الجسم نتيجة ذلك. ولكن عندما تكون $T_1 < T_2$، فإن محصلة انسياب الحرارة ستكون من محيط الجسم الخارجي إليه مما يؤدّي إلى ارتفاع درجة حرارة الجسم. أمّا إذا كانت الأجزاء المختلفة للمحيط الخارجي عند درجات حرارة مختلفة، فستصبح (المعادلة $14-6$) أكثر تعقيداً.

تطبيق الفيزياء

فقدان الجسم للحرارة عن طريق الاشعاع

المثال 14-11 قدّر **التبريد عن طريق الإشعاع**

يجلس لاعبٌ رياضيٌّ بملابس خفيفةٍ في غرفة تبديل ملابس ذات جدران دكناء، ودرجة حرارة $15^\circ C$. قدّر معدّل فقدان الحرارة عن طريق الإشعاع مفترضاً أنّ درجة حرارة الجلد هي $34^\circ C$ و $e = 0.70$ وافترض أنّ مساحة سطح الجسم غير الملامسة للمقعد $1.5 m^2$.

النهج: نستطيع أن نفترض تقديراً تقريبياً باستخدام الفرضيّات المعطاة إضافةً إلى (المعادلة $14-6$) ونعوّض درجات الحرارة بالكلفن.

الحـل: من المعادلة :

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Q}{\Delta t} &= e\sigma A(T_1^4 - T_2^4)\\ &= (0.70)(5.67 \times 10^{-8}\,W/m^2\cdot K^4)(1.5\,m^2)[(307\,K)^4 - (288\,K)^4]\\ &= 120\,W\end{aligned}$$

ملحوظة: الانبعاث الناتج من هذا الرياضي المسترخي يزيد قليلاً عمّا يستخدمه مصباح كهربائي تصنيفه 100-W.

توجيه لحلّ الأسئلة.

يجب أن تستخدم درجة الحرارة بالكلفن

إنّ الشخص المسترخي يولّد بشكل طبيعي حرارة داخلية بمعدّل يقارب مايولّده المصباح الكهربائي المصنف $100\ W$ (الفصل 15) وهو أقل من مقدار الحرارة المفقودة عن طريق الإشعاع كما حُسبت في هذا المثال. وعليه، فإنّ درجة حرارة الشخص تنخفض ليشعر الشخص بتعبٍ شديد. وغالباً ما يتجاوب الجسم مع فقدان الحرارة الشديد عن طريق زيادة معدّل العمليّات الأيضيّة (البند $15-3$)، وتُعدّ الرجفة إحدى الطرائق التي يزيد الجسم بوساطتها معدّلَ عملياته الأيضيّة. وبالطبع، فإنّ الملابس تساعد على هذا كثيراً. يوضح (المثال $14-11$) أن الشخص قد يشعر بعدم الراحة حتى وإن كانت درجة حرارة الهواء داخل الغرفة $25^\circ C$، وهي بذلك تكون غرفة دافئة. وإذا كانت جدران الغرفة وأرضها باردين، فإن الإشعاع سيحدث باتجاههم بصرف النظر عن مدى دفء هواء الغرفة. وبالفعل، فقد تم تقدير فقدان الحرارة بوساطة الإشعاع من شخص طبيعي جالس في غرفة طبيعية على أنه يعادل 50% من فقدان الحرارة الكلي. وتعدّ الغرف مريحة فقط عندما تكون جدرانها وأرضها دافئة، وبالمقابل يكون الهواء في داخلها أقل دفئاً. ويمكن تدفئة أرض الغرف وجدرانها بوساطة قنوات ماء ساخن، أو وحدات تدفئة كهربائية. وأصبحت أنظمة التدفئة هذه أكثر انتشاراً في يومنا هذا. ومن المثير أن تعلم أنّه وقبل أكثر من 2000 عام استخدم الرومان في مناطق امبراطوريتهم جميعها.

تطبيق الفيزياء

الغرفة المريحة

تؤثر درجة حرارة الجدران والمحيط الخارجي إضافة إلى الهواء على مستوى الراحة.

وحتى في المناطق البعيدة جدًّا على أطرافها (في بريطانيا كمثال) قنوات المياه الساخنة والبخار في أرضيات منازلهم لتدفئتها.

المثال 12-14 قدّر **إبريقا شاي.**

إذا كان لديك إبريقا شاي؛ أحدهما خزفي ($e = 0.70$) والآخر فلزّي لامع ($e = 0.10$). يحتوي كلٌّ منهما على 0.75 L من الشاي عند درجة حرارة 95°C. (أ) قدّر معدل فقدان الحرارة من كلٍّ منهما. (ب) قدّر مقدار الهبوط في درجة الحرارة بعد 30 دقيقة لكلّ منهما. وافترض أنّ درجة حرارة محيطهما الخارجي هي 20°C. وأنّ الحرارة تفقد عن طريق الإشعاع فقط.

النهج: أعطينا المعلومات الضرورية جميعها لحساب الحرارة المفقودة عن طريق الإشعاع باستثناء المساحة. ويحتوي كلُّ إبريق شاي على 0.75 L. ونستطيع أن نعدّه مكعب الشكل وطول ضلعه 10 cm (الحجم = 1.0L) مع احتمالية فقدانه لحرارته من خلال خمسة من وجوهه الستة. ولتقدير الانخفاض في درجة الحرارة في (ب)؛ نستخدم مبدأ الحرارة النوعية. ونهمل مساهمة الإبريقين مقارنة بمساهمة الماء.

الحل: (أ) المساحة السطحية للإبريق الذي عُدَّ مكعباً(بالتقريب) وطول ضلعه 10 cm بدلالة خمسة وجوه فقط هي $5 \times (0.1\ \text{m})^2 = 5 \times 10^{-2}\ \text{m}^2$ تقريباً. وعليه. فإنّ معدل فقدان الحرارة حوالي:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Q}{\Delta t} &= e\sigma A(T_1^4 - T_2^4)\\ &= e(5.67 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4)(5 \times 10^{-2}\ \text{m}^2)[(368\ \text{K})^4 - (293\ \text{K})^4]\\ &\approx e(30)\ \text{W}\end{aligned}$$

أو 20 W تقريباً للإبريق الخزفي ($e = 0.70$) و 3 W للإبريق المتلألئ ($e = 0.10$).

(أ)ولتقدير الانخفاض في درجة الحرارة: نستخدم الحرارة النوعية للماء. ونهمل مساهمة الإبريقين. وكتلة 0.75 L ماء هي 0.75 kg. (تذكر أنّ $1.0\ \text{L} = 1000\ \text{cm}^3 = 1 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$ و $\rho = 1000\ \text{k/m}^3$).

وباستخدام (المعادلة 14 − 2) و (الجدول 14 − 1) نحصل على

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc\,\frac{\Delta T}{\Delta t}$$

وعليه:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q/\Delta t}{mc} \approx \frac{e(30)\ \text{J/s}}{(0.75\ \text{kg})(4.186 \times 10^3\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)} = e(0.01)\ \text{C}^\circ/\text{s}$$

وبعد 30 دقيقة (1800 s)، $\Delta T = e(0.01\ \text{C}^\circ/\text{s})\Delta t = e(0.01\ \text{C}^\circ/\text{s})(1800\ \text{s}) = 18e\ \text{C}^\circ$ أو حوالي 12C° للإبريق الخزفي ($e = 0.70$) وحوالي 2C° للإبريق الفلزي اللامع ($e = 0.10$). وعليه، فإنّ الإبريق الفلزي اللامع يتميز عن الآخر من وجهة نظر الإشعاع على الأقل.

ملحوظة: يمكن للحمل الحراري والتوصيل الحراري أن يقوما هنا بدور أكبر من الإشعاع.

تطبيق الفيزياء

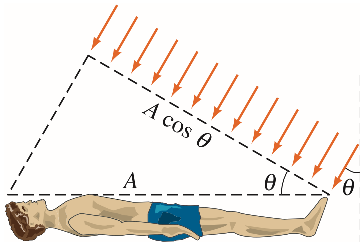
اشعاعات من الشّمس

لا يمكن حساب تسخين جسم بوساطة الشمس باستخدام (المعادلة 14 − 6) حيث تفترض المعادلة درجة حرارة منتظمة T_2 لمحيط الجسم. أمّا الشمس فهي مصدر نقطي أساسًا. وعليه. فإنّ الشمس يجب أن تعامل كمصدر منفرد للطاقة. ويحسب التسخين بوساطة الشمس علمًا بأنّ 1350 J من الطاقة القادمة من الشمس تصطدم بالغلاف الجوي للأرض خلال كل ثانية لكلّ $m2$ من المساحة التي تصنع زاوية قائمة مع أشعة الشمس. ويسمى الرقم 1350 W/m² **الثابت الشّمسيّ**. ويمتص الغلاف الجوي ما يقارب 70% من هذه الطاقة قبل أن تصل سطح الأرض حسب غلاف الغيوم. وعندما تكون السماء صافية. فإنّ حوالي 1000 W/m² سيصل سطح الأرض. ويمتصّ جسمٌ انبعاثيته e ومساحته A وهو مواجه للشمس طاقةً (بالواط) معدلها:

الثابت الشّمسيّ

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000\ \text{W/m}^2)eA\cos\theta \qquad \textbf{(7-14)}$$

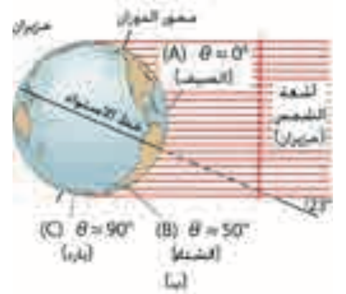
وتمثل θ الزاوية بين أشعة الشمس والعمود على المساحة A (الشكل 14 − 12). أي أنّ: ($A\cos\theta$) تمثل المساحة "الفاعلة" عند زاوية قائمة من أشعة الشمس.



الشكل 14 − 12 اصطدام الطاقة المشعّة بالجسم بزاوية θ.

يعتمد تفسير الفصول والغطاء الثلجي القطبي (انظر الشكل 14 – 13) على معامل $\cos\theta$ هذا في (المعادلة 14 – 7). ولا تُعدّ الفصول ناجمة عن قرب الأرض من الشمس؛ وفي الحقيقة فإنّ الصيف يحدث في نصف الكرة الشمالي عندما تكون الأرض في أبعد مسار لها عن الشمس. والزاوية (أي $\cos\theta$) هو ما يهمنا فعلًا. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ السبب في تسخين الشمس للأرض عند منتصف النهار أكثر منها عند الشروق أو الغروب يعزى إلى معامل الزاوية $\cos\theta$ هذا.





الشكل 14 – 13 (أ) تنشأ الفصول الأربعة بسبب الزاوية $23\frac{1}{2}°$ التي يصنعها محور الأرض مع مداره حول الشمس. و(ب) يصنع ضوء الشهر السادس الميلادي "يونيو" زاوية $23°$ تقريباً مع خط الاستواء. وعليه، فإن الزاوية θ في جنوب الولايات المتحدة (A) هي تقريباً $0°$ (ضوء نهار الصيف المباشر)، أمّا الزاوية في جنوب الكرة الأرضية (B) $\theta = 50°$ أو $60°$ عندها، يصبح مقدار الطاقة الممكن امتصاصها أقل، وبذلك يحلُّ الشتاء. وأما قرب القطبين (C) فلا يوجد أي ضوء نهار قوي مباشر أبداً. وتتغير $\cos\theta$ من حوالي $\frac{1}{2}$ خلال الصيف إلى 0 في وقت الشتاء لتعطي كمية الحرارة القليلة هذه المجال لتشكل الثلج.

المثال 13-14 قدّر تسمير البشرة – امتصاص الطاقة.

ما معدل امتصاص الطاقة من الشمس بوساطة شخص مستلقٍ أفقيًّا على الشاطئ في يوم ذي سماءٍ صافية إذا كانت الشمس تصنع زاوية $30°$ مع الرأسي؟ افترض أن $e = 0.70$، وأن $1000\ \mathrm{W/m^2}$ تصل سطح الأرض.

النهج: نستخدم (المعادلة 14 – 7)، ونأخذ طول شخص ماعلى أنّه $2\ \mathrm{m}$ تقريبًا وعرضه $0.4\ \mathrm{m}$ لتصبح مساحة سطحه (تقريباً): $A \approx (2\ \mathrm{m})(0.4\ \mathrm{m}) = 0.8\ \mathrm{m^2}$.

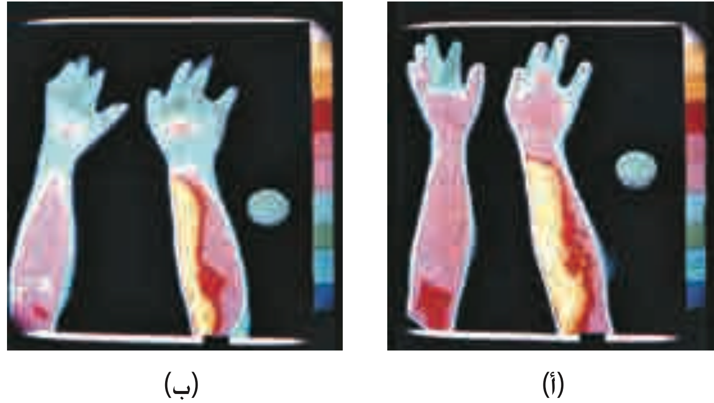
الحــلّ: بما أنّ $\cos 30° = 0.866$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000\ \mathrm{W/m^2})eA\cos\theta$$

$$= (1000\ \mathrm{W/m^2})(0.70)(0.8\ \mathrm{m^2})(0.866) = 500\ \mathrm{W}$$

ملحوظة: إذا كان الشخص يرتدي ملابس ملوّنةً فاتحة، فإنّ e ستكون أقلّ بكثير. وعليه، فسيمتص قدراً أقل من الطاقة.

ومن التطبيقات المثيرة للإشعاع الحراري في الطب التشخيصي هو المصور الحراري. وتمسح الآلة الخاصة "المصور الحراري" الجسد من نقاط كثيرة، فتقيس شدة الإشعاعات خلاله، وتبني صورة تمثل أشعة إكس (الشكل 14 – 14).
ويمكن الكشف بسهولة باستخدام هذه الطريقة عن طريق تسجيل الأماكن ذات النشاط الأيضي المرتفع عن الأورام نتيجة ارتفاع درجة حرارة هذه المناطق، وزيادة الاشعاع المترتب على ذلك.



(ب) (أ)

الشكل 14 – 14 صور حرارية لذراعي ويدي شخص سليم (أ) قبل و(ب) بعد تدخين سيجارة تظهرالانخفاض في درجة الحرارة الناتجة من ضعف الدورة الدموية المصاحب للتدخين. وقد لوّنت الصور الحرارية بدلالة درجة الحرارة. ويتغير اللون على اليمين من اللون الأزرق (بارد) إلى اللون الأبيض (ساخن).

تطبيق الفيزياء
علم الفلك - حجم النجم

المثال 14-14 قدّر تسمير البشرة – امتصاص الطاقة.

يبعث النجم الهائل بيتيلجيوس طاقة إشعاعية بمعدل 10^4 ضعف تلك المنبعثة من شمسنا، على الرغم من أنّ درجة حرارة سطحه تعادل نصف درجة حرارة سطح شمسنا (أي 2900 K). قدّر نصف قطر بيتيلجيوس، وافترض أن $e = 1$ علماً بأنّ نصف قطر الشمس $r_S = 7 \times 10^8\ \mathrm{m}$.

النهج: نفرض أنّ كلًّا من بيتيلجيوس والشمس كرويان، ومساحة سطح كلّ منهما $4\pi r^2$.

الحـل: نحل (المعادلة 14 – 5) لإيجاد A :

$$4\pi r^2 = A = \frac{(\Delta Q/\Delta t)}{e\sigma T^4}$$

إذن

$$\frac{r_B^2}{r_S^2} = \frac{(\Delta Q/\Delta t)_B}{(\Delta Q/\Delta t)_S}\cdot\frac{T_S^4}{T_B^4} = (10^4)(2^4) = 16 \times 10^4$$

وعليه $r_B = \sqrt{16 \times 10^4}\, r_S = (400)(7 \times 10^8\ \mathrm{m}) \approx 3 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$

ولو كان هذا النجم هو شمسنا، لوقعت الأرض في داخله (حيث تبعد الأرض عن الشمس $1.5 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$).

ملخص

تشير **الطاقة الداخلية** U إلى الطاقة الكلية لجزيئات الجسم جميعها . وهي لغاز مثالي أحادي الذرة :

$$U = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT \quad (1-14)$$

حيث تمثّل N عدد الجزيئات، أمّا n فتمثّل عدد المولات.

وتشير **الحرارة** إلى انتقال الطاقة من جسمٍ إلى آخر بسبب الاختلاف في درجة الحرارة بينهما. وعليه، فإنّ الحرارة تقاس بوحدات الطاقة مثل الجول.

تُعرف الحرارة والطاقة الداخلية في بعض الأوقات بدلالة السعر (الكالوري) أو (kcal) حيث:

$$1 \text{ kcal} = 4.186 \text{ kJ}$$

وهو مقدار الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء درجة مئوية واحدة.

وتعرف **الحرارة النوعية** c لمادة ما على أنها مقدار الطاقة (أو الحرارة) الضرورية لتغيير درجة حرارة وحدة كتلة واحدة من المادة درجة واحدة. وتعطى بالمعادلة:

$$Q = mc\,\Delta T \quad (2-14)$$

حيث تمثل Q مقدار الحرارة الممتصة أو المحررة، أما $T\Delta$ فهي مقدار الزيادة أو النقصان في درجة الحرارة، في حين تمثّل m كتلة المادة.

وعندما تنساب الحرارة بين أجزاء النظام المعزول، فإنّ حفظ الطاقة يخبرنا بأنّ الحرارة المكتسبة إلى جزء من النظام ستعادل الحرارة المفقودة من جزء آخر من النظام. وهذا هو جوهر المسعرية (قياس الحرارة) وهو القياس الكمي للحرارة المتبادلة .

وغالبًا ما يحدث تبادل للطاقة دون حدوث أي تغيّر في درجات الحرارة عندما تغير المادة طورها. إنّ حرارة الانصهار هي الحرارة الضرورية لصهر 1 kg من المادة الصلبة وتحويلها إلى سائلة. وهي مكافئة أيضاً للحرارة المحررة نتيجة انتقال المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. وتعرف **حرارة التبخر** على أنها الطاقة الضرورية لتحويل 1 kg من المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. وهي أيضاً الطاقة المحررة عن تحوّل المادة من غاز الى سائل.

وتنتقل الحرارة من موضع (أو جسم) إلى آخر بثلاث طرائق مختلفة وهي: التوصيل الحراري، والحمل الحراري، والإشعاع.

ففي **التوصيل الحراري** تنتقل الطاقة من الجزيئات أو الإلكترونات ذات الطاقة الحركية المرتفعة إلى الجزيئات أو الإلكترونات المجاورة ذات الطاقة الحركية المنخفضة في أثناء تصادم بعضها ببعض.

أمّا **الحمل الحراري** فهو انتقال الطاقة بوساطة حركة الجزيئات جميعها إلى مسافات طويلة نسبياً.

في حين أنّ **الاشعاع** الذي لا يتطلّب وجود أيّ وسط ماديٍّ لحدوثه فهو انتقال الطاقة كتلك الطاقة الناجّة من الشمس بوساطة الأمواج الكهرومغناطيسية. كما وتشع الأجسام جميعها طاقة بكميات تتناسب طردياً مع كلّ من الأسّ الرابع لدرجة حرارتها بالكلفن (T^4) ومساحة سطحها. وتعتمد الطاقة المشعة (أو الممتصة) أيضاً على طبيعة السطح الذي يصنف بدلالة الانبعاثية e. (علماً بأنّ السطوح الدكناء تمتصّ وتشعّ أكثر من تلك السطوح اللامعة).

وتصل الإشعاعات المنطلقة من الشمس إلى سطح الأرض في يوم صافٍ بمعدل 1000 W/m^2.

أسئلة

1. ماذا يحدث للشغل المبذول عند هزّ إبريق عصير برتقال بشدة؟
2. هل تنساب الحرارة بين جسمين عندما يدفيء الساخن منهما البارد؟ وهل يتساوى التغيّر في درجات الحرارة بينهما؟
3. (أ) هل ستنساب الحرارة بصورةٍ طبيعيّةٍ من جسمٍ يملك طاقة داخلية أعلى إلى جسمٍ يملك طاقة داخلية أقلّ عندما يتلامس جسمان مختلفان في درجة الحرارة؟ (ب) هل يمكن للحرارة أن تنساب بين جسمين لهما الطاقة الداخلية نفسها. اشرح.
4. من الممكن لدرجات الحرارة أن تنخفض لأقلّ من درجة التجمد عدة مرّات خلال فصل الشتاء في المناطق الدافئة حيث تنمو النباتات الاستوائية. ويمكن التقليل من حجم التلف للنباتات الحساسة الناجم عن التجمد عن طريق ريّها خلال فترة المساء في تلك المناطق. وضح إجابتك.
5. من المعروف أنّ الحرارة النوعية للماء هي كمية كبيرة جداً. فسّر لماذا تجعل هذه الحقيقة استخدام الماء لأنظمة التدفئة (أي مشعات الماء الحار) أمراً حتمياً؟
6. لماذا يظلّ الماء في حافظة الماء الفلزية بارداً لفترة أطول عندما تبقى السترة المحيطة بالحافظة مبللة؟
7. فسّر لماذا تكون الحروق الناجمة عن البخار أكثر خطورةً على الجلد من حروق الماء الساخن عند درجة حرارة 100°C؟
8. فسّر لماذا يبرد الماء عندما يتبخّر (تنخفض درجة حرارته). استخدم كلا من مبدأ الحرارة الكامنة والطاقة الداخلية.
9. هل تطبخ البطاطا بسرعة أكبر عند غليان الماء؟
10. هل تبرد مروحة كهربائية اعتيادية الهواء؟ برّر إجابتك إن كانت نفيًا أو إيجابًا. وإذا كانت الإجابة بالنفي، فلماذا تستخدم؟
11. يمكن لدرجة الحرارة أن تصل إلى 700°C عند طبقات الجوّ العليا للأرض. ومع هذا، فيمكن لأيّ حيوان عند ذلك الارتفاع أن يموت متجمّدًا لا محترقاً. وضّحْ إجابتك.
12. نجا مستكشفون في حملةٍ فاشلةٍ للقطب الشمالي من الموت المحقّق بعد أن غطُّوا أجسادهم بالثلج. لماذا قاموا بذلك؟
13. لماذا نشعر ببرودة أكثر عند السير على رمل الشاطىء المبلل مقارنة مع سيرنا على رمل شاطىء جاف؟
14. إذا سمعت أنّ جسمًا ما يمتلك "محتوًى حراريًّا مرتفعًا". فهل يعني ذلك أنّ درجة حرارته مرتفعة؟ فسّر.
15. عندما تستخدم مواقد الهواء الساخن لتدفئة المنازل، لماذا يعدّ وجود مسرب للهواء يسمح له بالعودة إلى الموقد ضروريًّا؟ ماذا يحدث إذا أغلق المسرب بخزانة كتبٍ مثلًا؟
16. تكون مراوح السقف في بعض الأحيان قابلةً للحركة في الاتجاهين؛ فتقوم بدفع الهواء نحو الأسفل في موسم ما، وتسحبه إلى الأعلى في موسم آخر. بأي طريقة يجب أن تثبت المروحة في فصلي الصيف والشتاء؟
17. تصنف أكياس النوم الخفيفة والسترات الواقية من الرصاص بدلالة سمكها بالإنشات أو السنتيمترات عند حزمها ووضعها فوق رفوف خزانة. فسر.
18. يوضع أعلى شريحة المعالج "مصرّف الحرارة" الذي يتكون من مجموعة كبيرة من الصفائح المتوازية. فلماذا صُنع بهذه الطريقة؟
19. تهبُّ أنسام البحر غالباً في الأيام المشمسة على الشواطئ المجاورة للكتل المائية الكبيرة. فسّر لماذا يحدث ذلك في ضوء معرفتك بأنّ درجة حرارة الأرض ترتفع بسرعة أكبر من درجة حرارة الكتل المائية المجاورة.
20. تكون أرضيّة المنزل أبرد عند السماح للهواء بالانسياب أسفل أساساته مقارنة بالمنزل المبني مباشرةً فوق الأرض ولا يسمح بمرور الهواء أسفله كما لو أنّ أساسه قد صنع من قطعة خرسانة مسلحةهائلة فسّر.
21. ربّما يشعر شخص بدفء الجو عندما تكون درجة الحرارة 22°C، ولكنّه حتمًا يشعر بالبرودة وهو في بركة ماء درجة حرارتها 22°C. لماذا؟
22. فسّر لماذا تقرأ درجة الحرارة دائمًا والمقياس في الظلّ.
23. قد يبرد جسم طفل خداج موضوع في حاضنة بصورة كبيرة عندما تكون درجة حرارة الهواء في الحاضنة دافئة. فسّر.

24. لماذا طليت بطانة قارورة حافظة لدرجة الحرارة بالفضّة (شكل 14 – 15) ولماذا تمّ تفريغ الهواء بين جداريها؟



الشكل **14 - 15**
(مسألة 24).

25. تخيَّل وجود حائطٍ معزولٍ عزلاً جيّدًا – أي أنّ مقاومته الحرارية مرتفعة R_1. ماذا سيحدث للمقاومة الحرارية الكلية عندما تضع نافذة ذات مقاومة حرارية منخفضة R_2 في منتصف الحائط؟ أعط إجابتك بالمقارنة مع R_1 و R_2. (تلميح: لا يزال الاختلاف في درجة الحرارة عبرالحائط متساوياً عند النقاط جميعها).

26. تفقّد الحرارة من النوافذ بعدَّةِ طرقٍ منها : 1- التهوية عند الحواف. 2- من خلال الإطارات. 3- من خلال الزجاج. 4- عن طريقة الإشعاع. (أ) ما آلية فقدان الحرارة لأول ثلاث حالات: التوصيل الحراري، والحمل الحراري، والإشعاع. (ب) أيٌّ من حالات فقدان الحرارة السابقة تعمل الستائر السميكة على التقليل من قيمتها ؟ وَضِّحْ إجابتك بالتفصيل.

27. ستمتصّ قطعة من الخشب معرضة للشمس حرارة أكثر من قطعة فلزية لامعة بعدة أضعاف. ومع هذا، فإنّ قطعة الخشب تكون أقلّ سخونة عند لمسها مقارنة بالقطعة الأخرى. فسّر.

28. تبرد الأرض ليلاً بسرعة أكبر عندما يكون الجوُّ صافيًا مقارنةً مع الأيام الغائمة. لماذا؟

29. "غطاء الطوارئ" هو ملاءة بلاستيكية لامعة (مطلية بفلز ما) ورقيقة . فسّر كيف يمكن لهذا الغطاء أن يُحافظ على دفء شخص ثابت لا يتحرك؟

30. فسّر لماذا لا تخضع المدن الساحلية لدرجات حرارة قصوى مقارنةً مع المدن الداخلية عند الارتفاع نفسه عن سطح البحر.

مسائل

14 – 1 الحرارة كانتقال للطاقة

1. (I) ما كميّة الحرارة الضرورية (بالجول) لرفع درجة حرارة 30.0 kg من الماء من 15°C إلى 95°C؟

2. (I)كم ستصبح درجة حرارة 3.0 kg من الماء هي أساساً عند 10.0°C إذا زُوّدت بحرارة مقدارها 7700 J؟

3. (II) يستهلك شخصٌ متوسِّطُ النشاط نحو 2500 سعر غذائي في اليوم الواحد. (أ) ما المقدار المكافئ بالجول؟ (ب) ما المقدار المكافئ بدلالة الكيلو واط ساعة؟ (جـ) ما مقدار فاتورتك إذا كانت تسعيرة شركة الطاقة هي عشرة قروش لكل كيلو واط. ساعة؟ هل تستطيع أن تغذّي نفسك بهذا المقدار من المال؟

4. (II) تمثّل الوحدة الحراريّة البريطانية (Btu) وحدة الحرارة في نظام الوحدات البريطاني. وتعرف 1 Btu على أنّها مقدار الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة 1 lb من الماء 1 F°. أثبت ذلك 1 Btu = 0.252 kcal = 1055 J.

5. (II) يستطيع سخّان ماء توليد 32,000 kJ/h. ما كمية الماء القادرة على تسخينه من 15°C إلى 50°C خلال ساعة؟

6. (II) صنف سخّان غمس صغير عند 350 W. قدر الزمن الذي سيستغرقه لتسخين كوب من الحساء (افترض أنّ سعته 250 mL ماء) من 20°C إلى 60°C.

7. (II) ما مقدار الكيلو سعرات المتولدة من الكوابح خلال إيقاف سيارة كتلتها 1200-kg من سرعة 95kg/h إيقافًا كاملًا؟

14 – 3 و 14 – 4 الحرارة النوعية والمسعرية

8. (I) يحتوي نظام تبريد سيارة على 16 L من الماء. ما مقدار الحرارة الممتصة عند ارتفاع درجة حرارته من 20°C إلى 90°C؟

9. (I) ما الحرارة النوعية لقطعة من مادة فلزية كتلتها 5.1 kg تحتاج إلى 135 kJ من الحرارة لرفع درجة حرارتها من 18.0°C إلى 31.5°C؟

10. (II) تمتصُّ عيّنات من النحاس والألمنيوم والماء مقدار الحرارة نفسه، فترتفع درجة حرارة كل منها بالمقدار نفسه. ما نسب كتلها؟ [تلميح: انظر إلى الجدول 14 – 1].

11. (II) يقرأ ميزان حرارة زجاجي كتلته 35-g درجة حرارة 21.6°C قبل أن يُوضع في 135 mL ماء. ثم يقرأ درجة حرارة 39.2°C بعد أن يصل إلى وضع الاتزان مع الماء. فما درجة حرارة الماء الابتدائية؟

12. (II) ما درجة حرارة الاتزان الناتجة من وضع مكعب نحاسي كتلته 245-g ودرجة حرارته 285°C في كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 145g يحتوي على ماءٍ كتلته 825 g عند درجة حرارة 12.0°C؟

13. (II) أسقطت حذوة حصان حديدية (كتلتها 0.40 kg) بعد طرقها مباشرة (شكل 14 – 16) في وعاء حديدي كتلته 0.30-kg ودرجة حرارته 20.0°C، ويحتوي على 1.35L ماء. قدر درجة حرارة الحذوة الابتدائية إذا علمت أن درجة حرارة الاتزان هي 25.0°C؟



الشكل **14 - 16**
(مسألة 13).

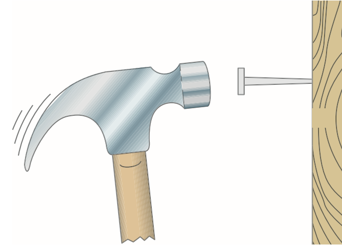
14. (II) سُخّنَتْ عَيّنَةٌ كتلتها 215-g إلى درجة حرارة 330°C. ثمّ غُطِّست في كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 105-g يحتوي على 165 g من الماء، وميزان حرارة زجاجي كتلته 17-g عند درجة حرارة 12.5°C. فإذا كانت درجة الحرارة النهائية 35.0°C. فما الحرارة النوعية للعَيّنة؟ (افترض عدم فقدان أيِّ كمية من الماء عن طريق التبخير)؟

15. (II) ما الزمن الذي يستغرقه وعاء تسخين مصنف عند 750-W لإيصال 0.75L ماء إلى درجة الغليان بدءاً من 8.0°C؟ افرض أنّ كتلة وعاء التسخين المصنوع من مادة الألمنيوم هي 360 g، وأنّ لا فقدان لأيّ كميّة من الماء عن طريق التبخير؟

16. (II) قدّر بدلالة القراءات التالية محتوى قطعة حلوى من السعرات الحرارية إذا كانت كتلتها 15-g: إذا تركت قطعة الحلوى لتجف تمامًا قبل وضعها في المسعر الحراري القنبلة. كتلة القنبلة المصنوعة من الألمنيوم هي 0.725 kg ومغمورة في 2.00 kg من الماء الموجود داخل مسعر حراري كتلته 0.624 kg. ودرجة حرارة الخليط الابتدائية هي 15.0°C ودرجة الحرارة النهائية هي 53.5°C.

17. (II) عند وضع قطعة حديد كتلتها 290-g، و درجة حرارتها 180°C داخل كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 95-g ويحتوي على 250 g من الجليسرين درجة حرارته 10°C، أصبحت درجة الحرارة النهائية للخليط 38°C. قدّر قيمة الحرارة النوعية للجليسرين.

18. (II) يدق رأس مطرقة كتلته 1.20-kg مسمارًا بسرعة ابتدائية مقدارها 6.5 m/s (شكل 14 – 17) فيسكن تمامًا. قدر الارتفاع في درجة حرارة مسمار (كتلته 14-g) الناتج من دقه 10 مرّاتٍ متتاليةٍ بالمطرقة. افرض أنّ المسمار سيمتصّ الطاقة المتولّدة جميعها.


الشكل **14 - 17**
(مسألة 18).

19. (II) أُسقطت كرةٌ فلزيّةٌ كتلتها 0.095-kg من سطح مبنى ارتفاعه 45-m. ما الارتفاع في درجة حرارة الكرة إذا امتصّت 65% من الطاقة الحرارية الناتجة من تصادمها مع الأرض؟

20. (II) تمّ تعريف السعة الحرارية C لجسم ما على أنّها كمية الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة الجسم بمقدار 1°C. وعليه، فإن كمية حرارة مقدارها Q ضرورية لرفع درجة الحرارة بمقدار ΔT: $Q = C\Delta T$. (أ) اكتب السعة الحرارية C بدلالة الحرارة النوعية c للمادة. (ب) ما السعة الحرارية لـ 1.0 kg من الماء؟ (جـ) ما السعة الحرارية لـ 25 kg من الماء؟

14 – 15 الحرارة الكامنة

21. (I) ما مقدار الحرارة الضرورية لصهر 16.50 kg من الفضّة إذا علمت أنّ درجة حرارتها الابتدائية 20°C؟

22. (II) يمكن لشخصٍ ما أن يخسر 180 kcal من الحرارة خلال التمرين في 30 دقيقة عن طريق تبخّر الماء من الجلد. فما مقدار الماء المفقود؟

23. (I) إذا زوّد وعاء للأكسجين السائل عند درجة حرارة –183°C بمقدار 2.80×10^5 J، فما مقدار الأكسجين المتبخّر؟

24. (II) أسقط مكعب ثلج كتلته 30-g، وقريب من درجة انصهاره في وعاء معزول يحتوي على نيتروجين سائل. فما مقدار النيتروجين المتبخر إذا كان عند درجة حرارة تبخره (77 K) وكانت حرارة تبخره الكامنة هي 200 kJ/h؟ افترض للسهولة أنّ الحرارة النوعية للثلج ثابتة وأنّها تعادل قيمتها قرب درجة انصهارها؟

25. (II) أُخرج مكعب ثلج من براد درجة حرارته –8.5°C، ووُضِعَ مسعرٌ حراريٌّ من الألمنيوم كتلته 95-g يحتوي على 310 g ماء عند درجة حرارة الغرفة 20.0°C. فما كتلة مكعب الثلج الأولية إذا علمت أنّ درجة حرارته 17.0°C؟

26. (II) سخان من الحديد كتلته 230 kg، يحتوي على 83 kg من الماء عند درجة حرارة 18°C. ويزود السخان طاقة بمعدل 52,000 kJ/h. ما الزمن اللازم للماء لكي : (أ) يصل إلى درجة التبخر؟ و(ب) يتحول كلياً إلى بخار؟

27. (II) يستهلك درّاج في يوم سباق حار 8.0 L من الماء خلال فترة أربع ساعات. ما مقدار الطاقة التي يستهلكها الدراج (بالكيلوسعر) خلال ركوبه مفترضًا أنّ طاقة الدراج الكلية استهلكت في تحويل الماء إلى عرق؟ (علمًا بأن فعالية الدراج هي فقط 200% حيث معظم الطاقة المستنفذة تتحول إلى طاقة).

28. (II) ما كتلة بخار ماء درجة حرارته 100°C الواجب إضافتها إلى 1.00 kg من الثلج عند درجة حرارة 0°C ليتحوَّل إلى سائل عند 20°C؟

29. (II) إذا كانت الحرارة النوعية للزئبق 138 J/kg·°C فحدّد الحرارة الكامنة لانصهار الزئبق باستخدام بيانات المسعر الحراري التالية: عند وضع 1.00 kg من الزئبق الصلب (ودرجة حرارته -39.0°C) في مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 0.620 kg، ويحتوي على 0.400 kg ماء عند 12.80°C أصبحت درجة حرارة الاتزان النهائية 5.06°C.

30. (II)تخترق رصاصة كتلتها 70-g مكعب ثلج درجة حرارته 0°C بسرعة ابتدائية مقدارها 250 m/s وتستقر في داخله. افترض أن درجة حرارة الرصاصة لا تتغير بمقدار ملحوظ. حدّد كمية الثلج المنصهرة نتيجة التصادم.

31. (II) تنزلق متزلجة كتلتها 54.0-kg من سرعة 6.4 m/s إلى السكون. افترض أنّ الثلج عند 0°C، وأنّ الثلج امتص 50% من الحرارة المتولّد بالاحتكاك. احسب مقدار الثلج المنصهر.

32. (II) لاحظ محقّقُ الجنايات في موقع جريمة أنّ طلقة رصاصيّة كتلتها 8.2-g قد توقفت داخل إطار الباب وانصهرت تماماً عند التصادم. على افتراض أن الطلقة قد انطلقت عند درجة حرارة الغرفة (20°C) فما سرعة خروج الطلقة من فوهة السلاح كما حسبها المحققون؟

14 – 16 إلى 14 – 8 التوصيل، والحمل الحراري، والإشعاع.

33. (II)وُضع أحد طرفي عمود من الألمنيوم قطره 33-cm عند درجة حرارة 460°C، وغمس طرفه الآخر في ماء عند 22°C. احسب معدل التوصيل الحراري على امتداد العمود.

34. (I) احسب معدل الانسياب الحراري بوساطة التوصيل الحراري في (المثال 14 – 10) مفترضاً رياحاً قوية فجائية، ودرجة حرارة خارجية مقدارها -5°C.

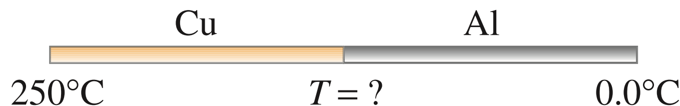
35. (أ)ما مقدار القدرة المشعّة بوساطة كرة من التنجستن (إشعاعيتها $e = 0.35$) ونصف قطرها 22 cm عند درجة حرارة 25°C؟ (ب) ما محصلة انسياب الطاقة نحو الخارج من الكرة إذا علمت أنّ الكرة أُبقيت داخل غرفة درجة حرارة جدرانها ثابتة عند –5°C؟

36. (II) توصيل الجلد الحراري. افترض أن 200 W من الحرارة ينساب عن طريق التوصيل الحراري من الأوعية الدموية أسفل الجلد إلى سطح جسم مساحته السطحية 1.5 m². قدّر متوسط طول الأوعية الدموية أسفل سطح الجلد إذا علمت أن الاختلاف في درجات الحرارة بين طرفيها هو 0.50°C.

37. (II) تشترك غرفتان مكعبتا الشكل طول ضلع كلٍّ منهما 4.0 m في حائط حجري سمكه 12-cm. إذا كانت درجة حرارة إحدى الغرفتين 10°C، في حين كانت درجة حرارة الغرفة الأخرى 30°C بسبب إنارتها بالمصابيح. فما عدد المصابيح المنارة والكافية لإبقاء درجة حرارة الغرفة 30°C إذا علمت أن قدرة كل مصباح هي 100-W؟

38. (II) ما الفترة التي تستغرقها الشمس لصهر مكعب من الثلج عند 0°C مساحة سطحه الأفقية 1.0 m²، وسمكه 1.0 cm؟ افترض أن أشعة الشمس تصنع زاوية 30° مع الرأسي، وأن إشعاعية الشمس 0.050.

39. (II) وصلت نهايتا عمودين لهما الطول نفسه ومساحة المقطع العرضية نفسها كذلك، أحدهما من النحاس، والآخر من الألمنيوم ببعضهما بعضا (شكل 14 – 18). وضع الطرف الآخر لعمود النحاس في فرن أبقيت درجة حرارته عند 250°C. في حين وضع طرف عمود الألمنيوم الآخر في حمام من الثلج عند درجة حرارة 0°C. احسب درجة الحرارة عند نقطة التقاء العمودين مع بعضهما بعضًا.

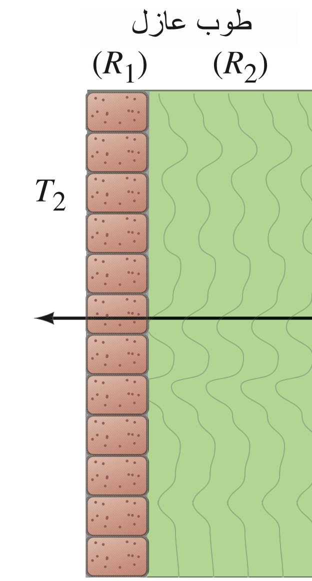


الشكل **14 - 18** (مسألة 39).

40. (II) (أ) قدّر باستخدام الثابت الشمسي معدّلَ وصول الطاقة إلى الأرض ككل من الشمس. (ب) قدّر متوسط درجة الحرارة السطحية مفترضاً أن الأرض مشع مثالي ($e = 1.0$) لأنّها ستشع مقدار الطاقة الساقطة نفسها عليها إلى الفضاء (أي أن الأرض في وضع الاتزان).

41. (II) يولّد مصباح ضوئي مصنف عند 100-W مقداراً من الحرارة يعادل 95 W يبددها من خلال زجاجة. إذا علمت أنّ نصف قطره 3.0 cm وسمكه 1.0 mm. ما الفرق في درجة الحرارة على جانبي سطح الزجاج الداخلي والخارجي؟

42. (III) افترض أنّ عزل حائط ما في منزل ينتج من طبقة من الطوب سمكها 4.0-in، وطبقة أخرى عازلة مصنفة عند R-19 كما هو مبين في (الشكل 14 – 19). فما معدل فقدان الحرارة الكلي خلال هذا الحائط إذا علمت أنّ المساحة السطحية الكلية للحائط هي 240 ft^2، وأنّ الفرق في درجات الحرارة خلاله هي 12 F°؟

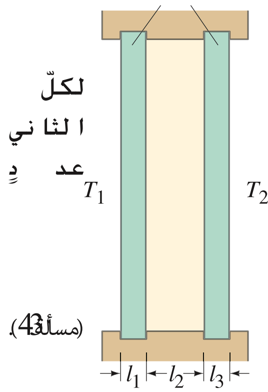


الشكل **14 - 19** طبقتان تعزلان حائط. (مسألة 42).

43. (III) تتركب النافذة ثنائية اللمعان من لوحين زجاجيين يفصل بينهما حيز من الهواء (الشكل 14 – 20). (أ) أثبت أنّ معدّلَ انسياب الحرارة عن طريق التوصيل الحراري خلال هذه النافذة يعطى بالمعادلة التالية :

$$\frac{Q}{t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{l_1/k_1 + l_2/k_2 + l_3/k_3}$$

حيث إنّ k_1 و k_2 و k_3 هي التوصيل الحراري من لوح الزجاج الأول، والهواء، ولوح الزجاج على الترتيب. (ب) عمّم هذه العبارة لأيٍّ من المواد المرتبة بجانب بعضها بعضًا.



الشكل **14 - 20** (مسألة 43)

44. (III) ما الزمن المستغرق بالتقريب لمكعب من الثلج كتلته 11.0 kg عند 0°C لكي ينصهر تماماً داخل صندوق مصنوع من الفلين الأبيض مغلق تماماً، إذا كانت أبعاد الصندوق 25 cm × 35 cm × 55 cm، وسمك جدرانه 1.5 cm؟ افترض أن موصلية مادة الصندوق هي خفض موصلية الهواء وأنّ درجة حرارة الهواء خارج الصندوق هي 32°C.

مسائل عامة

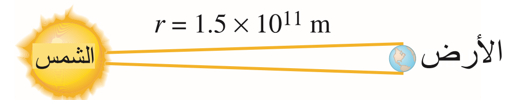
45. يحتوي مشروبٌ غازيٌّ على 0.20 kg تقريبًا من السائل على درجة 5°C . شرب هذا السائل سيعمل على استهلاك كمية من دهون الجسم بسبب الحاجة إلى كمية من الطاقة لرفع درجة حرارة السائل إلى حرارة الجسم (37°C). ما مقدار سعرات الغذاء الواجب توافرها في الشراب كي يكون في وضع إتزان تام مع كمية الحرارة الضرورية لتدفئة السائل؟

46. إذا كان الفحم الحجري يوفر 30 MJ/kg عند حرقه. فما مقدار الفحم الضروري لتدفئة منزل يحتاج إلى 2.0×10^5 MJ طوال فترة الشتاء؟ افترض أن 30% من الحرارة يفقد نحو الأعلى خلال المدخنة.

47. لتحصل على فكرة عن كمية الطاقة الحرارية الموجودة في محيطات العالم، قدّر كمية الحرارة المحررة عند تبريد مكعب من مياه المحيط، طول ضلعه 1 k . درجة كلفن واحدة. (تعامل مع مياه المحيط على أنّها مياه نقية لهذا التقدير).

48. تمّ اختبار طلقة من الرصاص كتلتها 15-g بإطلاقها على قطعة خشبية ثابتة كتلتها 1.05 kg. وتمتص الطلقة والقطعة الخشبية الحرارة المتولّدة جميعها. وعند الوصول إلى الاتزان الحراري، ارتفعت درجة الحرارة بمقدار 0.020 C°. قدّر سرعة دخول الطلقة.

49. (أ) أوجد القدرة الكلية التي تشعها الشمس في الفضاء مفترضاً أنّ الشمس مشع مثالي عند $T = 5500$ K. ونصف قطر الشمس 7.0×10^8 m. (ب) بناءً على ذلك، حدّد القدرة لكلِّ وحدة مساحةٍ والتي تصل الأرض على بعد 1.5×10^{11} m.



الشكل **14 - 21** (مسألة **49**).

50. يولّد شخص كتلته 70-kg خلال حركته اليومية 200 kcal. افترض أنّ 20% فقط من المقدار السابق يُستغلّ في شغلٍ مفيد. في حين يتحول 80% منه إلى حرارة. احسب الارتفاع في درجة حرارة الجسم بعد 1.00 h إذا لم يُفقد أيٌّ من هذه الحرارة إلى المحيط الخارجي.

51. تتدحرج صخرة كتلتها 340-kg من حافة مرتفع لتسقط رأسيًّا نحو الأسفل مسافة 140 m قبل اصطدامها بالأرض. قدر الارتفاع في درجة حرارتها إذا بقي 50% من الحرارة المتولدة في الصخرة.

52. أُلقيت كرة رصاصية كتلتها 2.3-kg في دلو معزول حجمه 2.5-L يحتوي على ماء عند درجة حرارة ابتدائية 20.0°C. إذا كانت درجة الحرارة النهائية للثنائي المكون من الماء– الرصاص 28.0°C. فما درجة الحرارة الابتدائية لكرة الرصاص؟

53. يرتدي متسلق جبال سترة مبطنة بريش إوزة سمكها 3.5 cm ومساحة سطحها الكلية 1.2 m^2. ودرجة الحرارة قرب سطح السترة هي 20°C–. وقرب الجلد 34°C. حدّد معدل انسياب الحرارة عن طريق التوصيل الحراري خلال السترة: (أ) مفترضًا أنّ السترة جافة، وأن الموصلية الحرارية k هي موصلية الريش. (ب) مفترضًا أنّ السترة مبللة، وأنّ k هي موصلية الماء، وأنّ سمك السترة قد تقلص إلى 0.50 cm.

54. إنّ معدّل متوسط أيض عدّاءة ماراثون خلال السباق 950 km/h. فإذا كانت كتلة العداءة 55 kg، فقدر كمية الماء التي ستفقدها العداءة نتيجة التبخّر من الجلد إذا استمر السباق لمدة 2.5 h.

55. قدّر معدل توصيل الحرارة من داخل الجسم إلى سطحه. افترض أنّ سمكَ النسيج 4.0 cm، وأنّ درجة حرارة الجلد 34°C، وأنّ درجة حرارة الجسم من الداخل 37°C، وأن مساحته السطحية 1.5 m^2. قارن هذه القيم المقيسة القريبة من 230 W والضروري أن يتخلّص منها شخص يقوم بجهد بسيط. وهذا يظهر بوضوح الحاجة الماسة إلى التبريد الحملي بواسطة الدورة الدموية.

56. يمتاز منزلٌ بجدرانٍ ذات جودة عزل عالية سمكها 17.5 cm (على افتراض إيصال حراري للهواء) ومساحتها $410\ m^2$، وسقف سمكه 6.5 cm، ومساحة $280\ m^2$، ونوافذ غير مغطاة ذات سمك 0.65 cm، ومساحة كلية $33\ m^2$. (أ) افترض أنّ الطريقة الوحيدة لفقدان الحرارة هي من خلال التوصيل الحراري. احسب المعدل الضروري لتزويد المنزل بالحرارة كي يحافظ على درجة حرارته الداخلية عند 23°C إذا كانت درجة الحرارة في الخارج −10°C ؟ (ب) إذا كانت درجة حرارة المنزل الابتدائية 10°C، فقدّر كمية الحرارة اللازمة لتزويد المنزل بها لرفع درجة حرارته إلى 23°C خلال 30 دقيقة. افترض أنّ ما يجب تدفئته هو هواء المنزل فقط، وأنّ حجم الهواء $750\ m^3$. (جـ) إذا كانت تكلفة الغاز الطبيعي $0.080 لكل كغم، وأن الحرارة الناجّة من احتراقه هي 5.4×10^7 J/kg، فما مقدار التكلفة الشهرية للمحافظة على المنزل كما في الفرع (أ) لمدة 24 h في اليوم مفترضاً أنّ 90 % من الحرارة الناجّة ستستخدم في تدفئة المنزل؟ افترض الحرارة النوعية للهواء 0.24 kcal/kg

57. تخترق طلقةٌ من الرصاص كتلتها 15-g تتحرك بسرعة ابتدائية 220 m/s حائطًا رقيقًا وتخرج من الجهة المقابلة بسرعة 160 m/s. إذا كانت الطلقة ستمتص 50% من الحرارة المتولدة : (أ) فكم الزيادة في درجة حرارة الطلقة؟ (ب) إذا كانت درجة حرارة الطلقة الابتدائية 20°C، فهل سينصهر أيُّ جزءٍ من الطلقة؟ وإذا كان الجواب نعم، فكم الكمية؟

58. تواجه ورقة شجر الشمس في يومٍ صافٍ، وتبلغ مساحتها السطحية 40 cm^2 وكتلتها 4.5×10^{-4} kg، وتبلغ إشعاعيتها 0.85. أما حرارتها النوعية فهي 0.80 kcal/kg·K. (أ) قدر معدل الارتفاع في درجة حرارة الورقة. (ب) احسب درجة الحرارة النهائية للورقة إذا فقدت حرارتها الكلية عن طريق الإشعاع للوسط المحيط بها عند 20°C. (جـ) ما الطرق الأخرى التي تفقد ورقة الشجر خلالها حرارتها؟

59. استخدم النتيجة من الفرع (أ) في (سؤال 58) وخذ بالحسبان إشعاع الورقة لحساب كمية الماء الضروري تبخيره من الورقة خلال ساعة للمحافظة على درجة حرارة 35°C.

60. ينصهر نيزك من الحديد عند دخوله غلاف الأرض الجوي. إذا كانت درجة حرارته خارج الغلاف −125°C، فاحسب السرعة الدنيا التي وصل إليها النيزك قبل دخوله الغلاف الجوي الأرضي مباشرةً.

61. تزداد درجة الحرارة داخل قشرة الأرض بمعدل 1.0°C لكل 30 m عمق. فإذا كان التوصيل الحراري للقشرة 0.80 W/°C·m. (أ) حدد الحرارة المنتقلة من داخل الأرض إلى سطحها الأرضي ككل خلال يوم واحد. (ب) قارن هذه الحرارة بمقدار الطاقة الساقطة على الأرض في يوم واحد بسبب الإشعاع القادم من الشمس.

62. خلال مباراة اعتيادية في لعبة السكواتش (الشكل 14 – 22)، يضرب لاعبان كرة مطاطية خفيفة باتجاه حائط، ويستمران كذلك إلى اللحظة التي يكاد يسقط فيها اللاعبان نتيجة الجفاف والإرهاق الشديد. افترض أن الكرة تصطدم في الحائط بسرعة 22 m/s، وترتد إلى الخلف بسرعة 12 m/s، وأن الطاقة الحركية المفقودة خلال العملية ستعمل على تسخين الكرة. احسب الارتفاع في درجة حرارة الكرة بعد أول تصادم؟ (الحرارة النوعية للمطاط 1200 J/kg·C° تقريباً).



الشكل **14 - 22** (مسألة 62).

63. ما النتيجة النهائية لمزج كتلتين متساويتين من الثلج عند 0°C وبخار الماء عند 100°C مع بعضهما بعضا؟

64. يستطيع شخصٌ ما أن يخسر حرارة في وسط بارد بوساطة التوصيل الحراري والإشعاع بمعدل يقترب من 200 W. قدر الفترة الزمنية الضرورية للجسم كي تهبط درجة حرارته من 36.6°C إلى 35.6°C عندما تقترب العمليات الأيضية من التوقف التام. افترض كتلة مقدارها 70 kg (انظر الجدول 14 – 1).

65. نفدت المياه الساخنة من سخّان ماء سعته 50-gal (185-L) بعد استخدامها في الاستحمام وغسل الصحون. وهذا يؤدي إلى الاقتراح القائل بأنّ المياه قد نفدت من الخزان لتعاد تعبئته عند درجة حرارة 10°C تقريباً. (أ) ما مقدار الطاقة الضرورية لإعادة تسخين الماء إلى 50°C؟ (ب) ما الفترة الزمنية اللازمة إذا كانت قدرة السخان الناتجة 9500 W؟

66. ستكون درجة حرارة سطح زجاج مصباح كهربائي مصنف عند 60-W نحو 65°C عندما تكون درجة حرارة الغرفة 18°C. قدر درجة حرارة مصباح كهربائي مصنف عند 150-W له حجم المصباح السابق نفسه. اعتبر فقط الإشعاع، وافترض أنّ 90% من الطاقة تشعُّ على شكل حرارة.

إجابات التمارين

أ: 0.21 kg.

ب: تحصر الستائر طبقة من الهواء بين الحائط الخارجي للغرفة والغرفة نفسها لتعمل عازلا ممتازا.





الديناميـكا الحراريـة هي دراسـة الحرارة والشـغل. أمّا الحرارة، فهي انتقال الطاقة نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة. في حين يعرف الشغل بأنّه انتقال الطاقة بطرق ميكانيكية وليس بسبب الاختلاف في درجات الحرارة. وأن قانـون الديناميكـا الحرارية الأول ما هو إلا صيغة عامة لحفـظ الطاقـة: الحـرارة Q المضافة إلـى النظام ناقص محصلة الشـغل W المبذول على النظـام يعادل التغير فـي الطاقـة الداخليـة ΔU للنظام: $\Delta U = Q - W$. وتظهـر الصـور اسـتخدامين للآلة البخاريـة: محطة طاقة حديثـة تعمل بحرق الفحم الحجري وقطار بخاري قـديم. وكلاهما يولد بخارًا يبذل شـغلًا علـى توربينات لتولـد الكهربـاء، وعلـى صبـاب يحـرك ذراعـا لإدارة عجـلات القطار. وتحد الطبيعة مـن فاعلية أي آلة كما وصفت في القانون الثانـي للديناميكا الحرارية. وأفضل طريقة لصياغة هذا القانـون تكون بدلالة كمية تدعى أنتروبي(القصور الحراري) وهـي غير محافظة وبدلًا من ذلـك، فهي مجبرة على الزيادة في أي عملية حقيقية. ويمكـن اعتبار الأنتروبي علـى أنهـا مقياس عدم الترتيب. ويخبرنـا القانون الثانـي للدنياميكا الحراريـة أنّه كلّما تقدم الزمن زاد مقدار عدم الترتيب في الكون.

الفصل 15

قوانين الديناميكا الحرارية

تمييز الحرارة من الشغل

الديناميكا الحرارية هو الاسم الذي يشير إلى دراسة العمليات التي تنتقل الطاقة من خلالها كحرارة وشغل. رأينا في الفصل السادس أن الشغل يبذل عندما تنتقل الطاقة من جسم إلى آخر بالطرق الميكانيكية. ورأينا في الفصل الرابع عشر أن الحرارة عبارة عن انتقال للطاقة من جسم إلى آخر عند درجة حرارة أقل. وعليه، فإن الحرارة كالشغل تماماً. وللتمييز بينهما؛ فقد تمّ تعريف الحرارة على أنها انتقال الطاقة نتيجة اختلاف في درجات الحرارة. أمّا الشغل فهو انتقال الطاقة ولكن ليس نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة.

وعند تناول الديناميكا الحرارية غالباً ما نشير إلى أنظمة معينة. والنظامُ جسمٌ أو مجموعة أجسام نرغب في دراستها (انظر البند 14 – 4). وأما كل شيء آخر في الكون فسوف نشير إليه على أنه "البيئة" أو "المحيط" الخارجي للنظام.

وسوف نختبر في هذا الفصل القانونين الرائعين في الديناميكا الحرارية. فالقانون الأول في الديناميكا الحرارية يربط بين انتقال الشغل والحرارة مع التغير في الطاقة الداخلية للنظام. ويمثل بعبارة عامة لحفظ الطاقة. أما القانون الثاني للديناميكا الحرارية، فيعبر عن حدود القدرة على عمل شغل نافع، وغالباً ما يوصف بدلالة القصور الحراري وهو مقياس لعدم الترتيب. وبالإضافة إلى هذين القانونين المهمّين فسوف نستعرض بعض الأجهزة العلمية المهمة ذات العلاقة مثل: الآلات الحرارية، والثلاجات، والمضخات الحرارية ومكيّفات الهواء.

1-15 القانون الأول في الديناميكا الحرارية

لقد عرّفنا الطاقة الداخلية للنظام في (البند $14-2$) على أنها المجموع الكلي لطاقة جزيئات النظام. ومن المتوقع أن تزداد الطاقة الداخلية للنظام إذا بُذِل شغلٌ على النظام، أو إذا أضيفت إليه حرارة. وبالمثل، فمن المتوقع أن تقل الطاقة الداخلية للنظام إذا فقدت الحرارة منه أو انسابت إلى الخارج، أو إذا قام النظام ببذل شغل على شيء من محيطه الخارجي. وعليه، فمن المنطقي أن يُوسّع مبدأ الشغل والطاقة، وهنا يُقترح القانون المهم الآتي: التغير في الطاقة الداخلية لنظام مغلق ما ΔU يُعادل الطاقة المضافة إلى النظام عن طريق التسخين ناقص الشغل المبذول بواسطة النظام على محيطه الخارجي. ونكتب بلغة المعادلات التالي:

القانـــون الأول فـــي الديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W \qquad (1-15)$$

حيث Q هي محصلة الحرارة المضافة إلى النظام، أمّا W فهي محصلة الشغل المبذول بواسطة النظام. ويجب أن نكون حذرين ومتناغمين في اتباع الإشارات المتفق عليها لكل من Q و W. وبما أن W في (المعادلة $15-1$) هو الشغل المبذول بواسطة النظام، فإنها ستكون سالبة في حالة أن الشغل بذل على النظام. وعليه، فإنّ الطاقة الداخلية U سوف تزداد. وبالمثل، فإن Q ستكون موجبة عند إضافة حرارة إلى النظام، وبذلك ستكون Q سالبة نتيجة مغادرة الحرارة للنظام.

حرارة مضافة +
حرارة مفقودة -
شغل مبذول على النظام -
شغل يبذله النظام +

تُعرف (المعادلة $15-1$) **بالقانون الأول للديناميكا الحرارية**. وهو أحد أهم قوانين الفيزياء وتستند صلاحية هذا القانون إلى التجارب (مثل تجربة جول) حيث لم تسجل أي ملاحظة ضده. وبما أنّ Q و W تمثلان انتقال الطاقة إلى داخل النظام أو إلى خارجه، فإن الطاقة الداخلية ستتغير تبعاً لذلك. وعليه، يمكن اعتبار القانون الأول في الديناميكا الحرارية على أنه صيغةعامة ورائعة لقانون حفظ الطاقة.

القانون الأول في الديناميكا هو حفظ الطاقة.

ومن الجدير بالذكر أن قانون حفظ الطاقة لم يُصَغ إلاّ في القرن الثامن عشر وبعد الاعتماد على تفسير الحرارة على أنها شكل من أشكال انتقال الطاقة.

ويمكن لنظام ما في حالة معينة وفي أي لحظة أن يمتلك مقداراً معيناً من الطاقة الداخلية U. ولكن النظام لا يمتلك مقداراً معيناً من الحرارة أو الشغل. وفي الواقع، عندما يُبذلُ شغلٌ على النظام (ومثال ذلك انضغاط غاز ما) أو عندما تضاف أو تؤخذ حرارة من النظام، فإن حالة النظام ستتغير. لذا، فإن الشغل والحرارة يرتبطان بعمليات ديناميكية حرارية تستطيع أن تنقل النظام من حالة إلى أخرى، ومع هذا فهما لا يميزان الحالة نفسها. وتُسمى الكمياتُ التي تصف حالة النظام مثل: الطاقة الداخلية U، والضغط P، والحجم V، ودرجة الحرارة T، والكتلة m، أو عدد المولات n، **متغيرات ِالحالة**. ولا تعدّ كلّ من Q و W من متغيرات الحالة.

الطاقة الداخلية هي صفة من صفات النظام، وليس الشغل ولا الحرارة.

المثال 15-1 استخدام القانون الأول

أُضِيف $2500\ J$ إلى نظام ما، وبُذل شغل مقداره $1800\ J$ عليه. فما التغير في الطاقة الداخلية للنظام؟

النهج: نطبق القانون الأول في الديناميكا الحرارية (معادلة $15-1$) على نظامنا.

الحل: إن مقدار الحرارة المضافة إلى النظام هو $Q = 2500\ J$. والشغل W المبذول بواسطة النظام هو $-1800\ J$. وهنا نلاحظ أنّ الإشارة سالبة؛ لأنه تمّ بذل $1800\ J$ على النظام (كما أعطيت) وهذا يكافىء $-1800\ J$ المبذول بواسطة النظام، علماً بأن المقدار الأخير هو الذي نحتاج إليه للتعويض في (المعادلة $15-1$) حسب اصطلاح الإشارات المشار إليه في الأعلى. وعليه:

$$\Delta U = 2500\ J - (-1800\ J) = 2500\ J + 1800\ J = 4300\ J$$

وقد تكون قد ظننت بالحدس بأنّك يجب أن تجمع $2500\ J$ مع $1800\ J$ علماً بأن الرقمين يعودان إلى مقدار الطاقة المضافة إلى النظام. فإذا كان هذا ظنّك فإنّك على صواب.

ملحوظة: لقد أجرينا هذه الحسابات بالتفصيل؛ للتأكيد على أهمية المتابعة الدقيقة للإشارات.

التمرين أ: ما مقدار التغير في الطاقة الداخلية في (المثال $15-1$) لو أن $2500\ J$ من الحرارة أضيفت إلى النظام، وأنّ النظام قد بذل $1800\ J$ (أي كناتج)؟

* القانون الأول الموسّع في الديناميكا الحرارية

لمعرفة القانون الأول جيّدًا؛ خذ بالحسبان نظامًا متحركًا يمتلك طاقةً حركيّةً KE وافترض وجود طاقة وضع أيضاً. وعليه، فإنّ القانون الأول في الديناميكا الحراريّة يجب أن يضمّ هذين الحدّين، وبذلك يصبح:

$$\Delta \text{KE} + \Delta \text{PE} + \Delta U = Q - W. \qquad (2-15)$$

المثال 2-15 تحول الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية.

تخترق رصاصة كتلتها 3.0-g، تتحرك بسرعة 400 m/s شجرةً، وتخرج من جانبها الآخر بسرعة 200 m/s. أين ذهبت طاقة الرصاصة الحركية KE المفقودة؟ وإلامَ تحولت هذه الطاقة؟

النهج: افترض أنّ النظام مكون من الرصاصة والشجرة. وبما أنّه لا توجد طاقة وضع مرتبطة بالنظام، وكذلك لم يقم النظام ببذل أي شغل، ولم يبذل عليه بواسطة قوة خارجية، ولم يُضَف أيّ مقدار من الحرارة إلى الجسم لعدم انتقال أي مقدار من الطاقة للنظام أو من النظام بسبب اختلاف درجات الحرارة- فإن طاقة النظام الحركية ستتحول إلى طاقة داخلية للرصاصة والشجرة.

الحل: من القانون الأول في الديناميكا الحرارية كما هو مبين في (المعادلة 15 – 2)،

لدينا: $Q = W = \Delta \text{PE} = 0$ وعليه:

$$\Delta \text{KE} + \Delta U = 0$$

أو

$$\Delta U = -\Delta \text{KE} = -(\text{KE}_f - \text{KE}_i) = \tfrac{1}{2}m(v_i^2 - v_f^2)$$
$$= \tfrac{1}{2}(3.0 \times 10^{-3}\,\text{kg})[(400\,\text{m/s})^2 - (200\,\text{m/s})^2] = 180\,\text{J}.$$

ملحوظة: تزداد الطاقة الداخلية للشجرة وللرصاصة نتيجة ارتفاع درجة حرارة كل منهما. ولو أننا اخترنا الرصاصة لتمثل النظام بمفردها، لرأينا أن شغلاً بذل عليها، ولرأينا انتقالاً للحرارة أيضا

2-15 عمليات في الديناميكا الحرارية والقانون الأول



الشكل 15 – 1 غاز مثالي داخل أسطوانة ذات ذراع متحرك

دعنا نحلل بعض العمليات في الديناميكا الحرارية في ضوء قانونها الأول. وسنختار نظامًا بسيطًا جدًّا كبداية: كتلة محددة من غاز مثالي، توضع في وعاء له ذراع متحرك كما هو موضح في (الشكل 15 – 1).

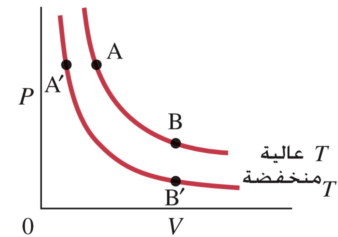
عملية ثابتة درجة الحرارة ($\Delta T = 0$)

وسنراقب أولاً عملية مثالية تجري عند درجة حرارة ثابتة. وسندعو هذه العملية بأحادية درجة الحرارة (أي أنها تبدأ وتستمر وتنتهي عند درجة الحرارة نفسها). وإذا أجريت عملية أحادية درجة الحرارة على غاز مثالي فإنّ $PV = nRT$ (المعادلة 13 – 3) تصبح PV = ثابت. وعليه، فإنّ العملية تتبع منحنًى مثل AB على مخطّطٍ PV المبين في (الشكل 15 – 12)، وهو منحنًى يمثّل PV = ثابت (كما في الشكل 13 – 12). ويمثل كلُّ نقطة على المنحنى مثل النقطة A حالةً من حالات النظام؛ أيْ ضغط النظام P وحجمه V عند لحظةٍ معيّنة. ويمكن تمثيل عمليّةٍ أخرى أحاديّة درجة الحرارة ولكن عند درجة حرارة أقلّ من سابقتها بمنحنى آخر مثل A′ B′ في (الشكل 15 – 2) (وسيكون الناتج: ثابت = $PV = nRT$ أقلّ عندما تكون T أقلّ). ويشار إلى المنحنيين في (الشكل 15 – 2) على أنّهما أحاديًّا درجة الحرارة.

خزان حرارة

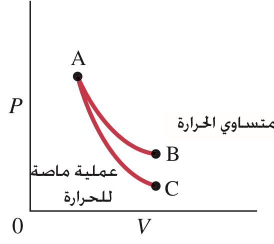
ونفترض أنّ الغاز ملامس لخزّان الحرارة (جسم ذو كتلة كبيرة جداً بحيث لن يحدث أيّ تغيير يذكر على درجة حرارته نتيجة تبادله الحرارة مع نظامنا). ونفترض أيضاً أنّ عملية الانضغاط (انخفاض الحجم) أو التمدد (زيادة الحجم) تحدث ببطء شديد لدرجة أنّ الغاز ككل يبقى في وضع الاتزان عند درجة الحرارة الثابتة. وإذا كان النظام يُمثَّل في البداية بالنقطة A في (الشكل 15 – 2) وأضيف مقدار من الحرارة Q إلى النظام، فإن حجم النظام وضغطه سيتغيران. وعليه، ستمثّل حالة النظام الجديدة بنقطة أخرى B على المنحنى. وإذا بقيت درجة الحرارة ثابتة، فإن الغاز سيتمدد وسيبذل مقداراً من الشغل على محيطه الخارجي (وسيؤثر بقوة في الذراع في (الشكل 15 – 1) ليحركه مسافة ما). وعندما تبقى درجة الحرارة في (المعادلة 14 – 1) ثابتة، فإن الطاقة الداخلية للنظام لن تتغير: $\Delta U = \frac{3}{2}nR\,\Delta T = 0$. وعليه، فمن القانون الأول في الديناميكا الحرارية (معادلة 15 – 1) $\Delta U = Q - W = 0$ و $W = Q$: أي أنّ الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال عمليّةٍ أُحاديّة درجة الحرارة يعادل كمية الحرارة المضافة إلى الغاز.

الشكل 15 – 2 مخطط PV لغاز مثالي يخضع لعمليات عند درجتي حرارة مختلفتين مع ثبوت درجة الحرارة في كلّ منهما.



عملية ثابتة درجة الحرارة (غاز مثالي)
T = ثابت, $Q = W$, $\Delta U = 0$

إنّ العملية ثابتة الحرارة (الكظمية) هي العملية التي لا يُسمح خلالها بانسياب الحرارة إلى داخل النظام أو خارجه: $Q = 0$. ويمكن لهذه الحالة أن تحدث عندما يكون النظام معزولاً عزلاً تاماً، أو عندما تحدث العملية بسرعة كبيرة لدرجة لا تترك وقتاً كافياً للحرارة التي تنساب عادة ببطء شديد للانسياب إلى الداخل ولا إلى الخارج. ويعدّ تمدد الغازات السريع جداً في محرك الاحتراق الداخلي للآلة مثالاً على هذه العملية التي يمكن اعتبارها كظمية. ويتبع التمدد البطيء الكظمي للغاز المثالي منحنى مثل المنحنى AC في (الشكل 15 – 3). وبما أن $Q = 0$، فإن $\Delta U = -W$؛ أي أن الطاقة الداخلية ستتناقص عندما يتمدد الغاز. لذا، فإن درجة الحرارة ستنخفض أيضاً (لأن $\Delta U = \frac{3}{2}nR\,\Delta T$). وهذا واضح في (الشكل 15 – 3) علماً بأن الناتج $PV\ (= nRT)$ هو أقل عند النقطة C منه عند النقطة B (منحنى AB للعملية أحادية درجة الحرارة حيث $\Delta U = 0$ و $\Delta T = 0$). وفي العملية العكسية خلال الانضغاط الكظمي (ومثالٌ على ذلك الذهاب من C إلى A) عند بذل الشغل على الغاز، فإنّ طاقته الداخلية ستزداد وترتفع بذلك درجة حرارته. وفي آلة الديزل، ينضغط مزيج الوقود والهواء كظمياً بسرعة وبمعدل 15 ضعفاً أو أكثر لترتفع درجة الحرارة بمقدار هائل نتيجة ذلك لدرجة كافية لتحفز عندها الاحتراق التلقائي للمزيج.



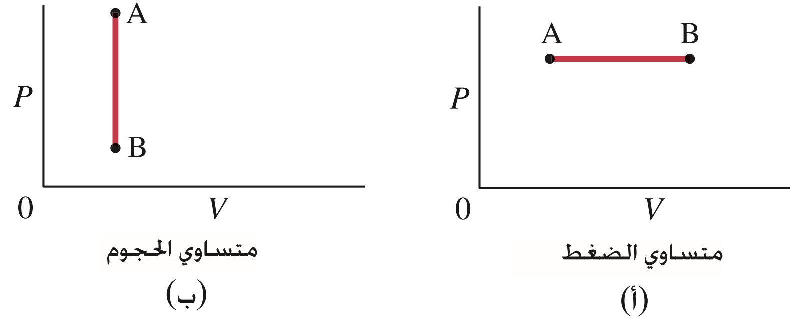
عملية كظمية $(Q = 0)$

الشكل 15 – 3 منحنى PV للعملية (AC) وأحادية درجة الحرارة (AB) لغاز مثالي.

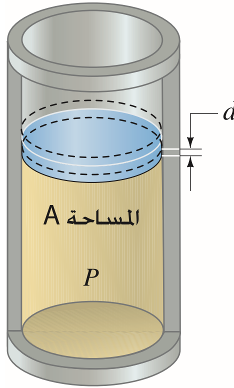
وتُعدّ العمليات عند درجة حرارة ثابتة، وتلك ذات الحرارة الثابتة عمليات قابلة للحدوث. وهناك عمليات بسيطة أخرى من الممكن حدوثها في الديناميكا الحرارية ممثلة على منحنيات PV في (الشكل 15 – 4): (أ) العملية أحادية الضغط: وهي العملية التي تحدث عند ضغط ثابت والتي يمكن تمثيلها بيانياً بخط أفقي منتظم على المنحنى PV (الشكل 15 – 4أ). (ب) العملية أحادية الحجم: وهي العملية التي لا يتغير الحجم خلالها (الشكل 15 – 4ب). ويبقى قانون الديناميكا الحرارية الأول صالحاً للتطبيق خلال هذه العمليات وخلال العمليات الأخرى جميعها.

عملية ثابتة الضغط:
$P =$ ثابت و $W = P\,\Delta V$
عملية أحادية الحجم:
$V =$ ثابت و $W = 0$

الشكل 15 - 4 (أ) عملية أحادية الضغط (ضغط ثابت)
(ب) عملية أحادية الحجم (حجم ثابت).



الشكل 15 – 5 يبذل شغل على المكبس عند تمدد الغاز، فيتحرك ال مسافة d.



إنّ حساب الشغل خلال أيّ عملية أمر مفيد. ويمكن حساب الشغل بسهولة خلال العملية عند ثبات الضغط (أحادي الضغط). وعلى سبيل المثال، إذا تمدّد الغاز خلال العملية كما في (الشكل 15 – 5) ببطء ليدفع الذراع، فإنّ قيمة الشغل المبذول على الغاز لرفع الذراع هو حاصل ضرب القوة F في المسافة d. ولكن القوة ما هي إلّا ضغط الغاز P مضروب في مساحة الذراع A. $F = PA$. وعليه:

$$W = Fd = PAd$$

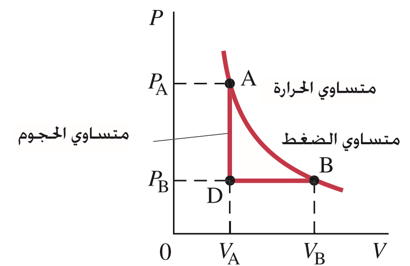
لأن $Ad = \Delta V$. وهو التغير في حجم الغاز، أي:

$$W = P\,\Delta V \quad \text{[ضغط ثابت]} \quad \textbf{(3 – 15)}$$

الشغل المبذول خلال تغير الحجم

وتبقى (المعادلة 15 – 3) صالحة عندما يتقلّص الغاز تحت تأثير ضغط ثابت. لتكون ΔV في تلك الحالة سالبة (لأن V تتناقص)؛ وتصبح W عندها سالبة لتعطي انطباعاً بأن الشغل قد بُذل على الغاز. كما أنّ (المعادلة 15 – 3) صالحة ويمكن تطبيقها على السوائل والمواد الصلبة. طالما بقي الضغط ثابتاً خلال العملية.

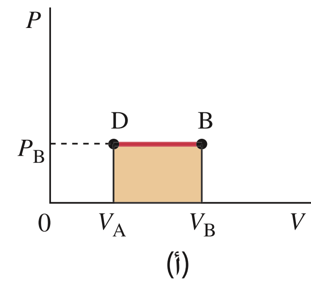
ولا يتغيّر الحجم في العملية أحادية الحجم (الشكل 15 – 4 ب) ويترتب على ذلك انعدام الشغل: $W = 0$.



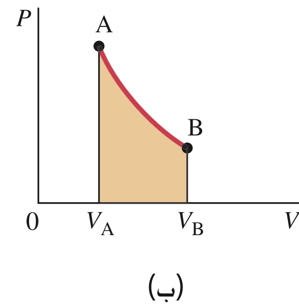
الشكل 15 – 6 منحنى PV لعمليات مختلفة (انظر النص) حيث يتغير النظام من A إلى B.

الشغل = المساحة تحت المنحنى PV.

الشكل 15 – 7 الشغل المبذول بواسطة الغاز يساوي المساحة تحت المنحى PV.



(أ)



(ب)

يظهر (الشكل 15 – 6) أحاديّ درجة الحرارة AB الذي رأيناه في (الشكل 15 – 2)، بالإضافة إلى عملية أخرى ممكنة ممثلة بالمسار ADB. وعند الانتقال من A إلى D لا يقوم الغاز ببذل أيّ شغل نتيجة لعدم تغير الحجم. أمّا عند الانتقال من D إلى B، فإن الغاز يبذل شغلاً مساوياً لـ $P_B(V_B - V_A)$، وهذا هو الشغل الكلي المبذول خلال العملية ADB.

وإذا تغير الضغط خلال عملية ما مثل تلك أحادية درجة الحرارة AB في (الشكل 15 – 2)، عندها لا يمكن استخدام (المعادلة 15 – 3) مباشرةً لتحديد الشغل. ولكن يمكن الحصول على تقدير تقريبي باستخدام قيمة "متوسطة"لـP في (المعادلة 15 – 3). وبدقة أكثر، فإنّ الشغل المبذول يعادل المساحة تحت المنحنى PV. وقد يكون هذا أكثر وضوحاً عندما يكون الضغط ثابتاً : كما يظهر في (الشكل 15 – 7أ) فإنّ الشغل المبذول هو $P_B(V_B - V_A)$ وهو المساحة المظللة. وبالمثل، فإنّ الشغل المبذول خلال العملية أحادية درجة الحرارة يساوي المساحة المظللة الظاهرة في (الشكل 15 – 7ب). ويمكن حساب الشغل المبذول في هذه الحالة باستخدام الرياضيات، أو عن طريق تقدير المساحة على ورقة بيانية.

المثال المفاهيمي 15-3 الشغل في العمليات أحادية الحرارة وأحادية درجة الحرارة.

لقد رأينا في (الشكل 15 –3) منحنيين PV لتمدد غاز بطريقتين هما: أحادية الحرارة، وأحادية درجة الحرارة. ولقد كان الحجم الابتدائي هو نفسه V_A في الحالتين، أمّا الحجم النهائي فكان متساوياً $(V_B = V_C)$. أيّ أنّ العمليتين تتطلبان من الغاز شغلاً أكبر لإنجازهما؟

الإجابة: نظامنا هو الغاز. يبذل الغاز شغلاً أكثر خلال العملية أحادية درجة الحرارة، ويمكن لنا أن نرى ذلك بطريقتين بسيطتين بالنظر إلى (الشكل 15 – 3). أولاً، إنّ "متوسط" الضغط كان أعلى خلال العملية AB أحادية الحرارة. وعليه، فإن $W = P_{av}\,\Delta V$ كانت أكبر (ΔV كانت نفسها في العمليتين) . ثانياً، نستطيع النظر إلى المساحة تحت كل منحنى: المساحة تحت المنحنى AB التي تمثل الشغل المبذول هي الأكبر (لأن المنحنى AB أعلى) من تلك تحت المنحنى AC.

التمرين ب: هل الشغل المبذول بواسطة الغاز في العملية ADB في (الشكل 15 – 6) أكبر من الشغل المبذول في العلمية AB أحادية الحرارة أم أقل منه أم يساويه؟

المثال المفاهيمي 15-4 عملية أحادية الحرارة (كظمية) بسيطة.

هذا مثال بسيط لعملية كظمية تستطيع عملها باستخدام رباط مطاطي. امسك رباطاً مطاطياً رقيقاً ومرخياً بيديك وقرّبه من شفتيك لتشعر بدرجة حرارته. مدّد الرباط فجأة وقرّبه مباشرة من شفتيك . يجب أن تشعر بارتفاع في درجة حرارته. فسّر بوضوح سبب ارتفاع درجة حرارة الرباط.

الإجابة: تمدد الرباط المطاطي الفجائي يجعل العملية كظمية لعدم وجود وقت كافٍ كي تدخل إلى النظام الرباط المطاطي أو تخرج منه. وعليه فإنّ $Q = 0$. وبما أنك تبذل شغلاً على النظام، فإن W هي مقدار سالب في (المعادلة 15–1) $(\Delta U = Q - W)$. لذا، فإن ΔU يجب أن تكون موجبة. وأي ارتفاع في الطاقة الداخلية للنظام يعزى إلى الارتفاع في درجة الحرارة (للغاز المثالي يعطى هذا بالمعادلة 14–1).

يعرض (الجدول 15 - 1) ملخصاً مختصراً للعمليات التي ناقشناها.

الجدول 15 – 1 عمليات ديناميكية حرارية بسيطة والقانون الأول

العملية	ما هو الثابت	ما يتنبأ به القانون الأول
أحادية درجة الحرارة	T = ثابت	$\Delta T = 0$ تجعل $\Delta U = 0$ وعليه $Q = W$
أحادية الضغط	P = ثابت	$Q = \Delta U + W = \Delta U + P\,\Delta V$
أحادية الحجم	V = ثابت	$\Delta V = 0$ تجعل $W = 0$ وعليه $Q = \Delta U$
أحادية الحرارة	$Q = 0$	$\Delta U = -W$

المثال 15-5 القانون الأول في عمليات أحادية الضغط وأحادية الحجم.

تقلّص غازٌ مثالي ببطء تحت ضغط ثابت مقداره 2.0 atm من 10.0 L إلى 2.0 L . وتمثل هذه العملية في (الشكل 15 – 8) بالمسار B إلى D. (وتنساب الحرارة خلال هذه العملية إلى خارج الغاز وتنخفض درجة الحرارة). ثمّ تضاف الحرارة إلى الغاز مع إبقاء الحجم ثابتاً والسماح للضغط ودرجة الحرارة بالارتفاع (الخط DA) إلى أن تصل درجة الحرارة إلى قيمتها الأولية ($T_A = T_B$). احسب (أ) الشغل الكلي المبذول بواسطة الغاز في العملية BDA . (ب) الحرارة الكلية المنسابة إلى الغاز.

النهج: (أ) يبذل الشغل فقط خلال عملية التقلص BD فقط. أما خلال العملية DA فيبقى الحجم ثابتاً؛ أي $\Delta V = 0$. وعليه، فلن يُبذل أي شغلٍ (المعادلة 15 – 3). (ب) نستخدم القانون الأول في الديناميكا الحرارية (المعادلة 15 – 1).

الحـل: (أ) الضغط خلال التقلص BD وهو $2.0\ \text{atm} = 2(1.01 \times 10^5\ \text{N/m}^2)$ والتغير في الحجم هو:

$$\Delta V = (2.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) - (10.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) = -8.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

وعليه، فإنّ الشغل المبذول هو:

$$W = P\,\Delta V = (2.02 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(-8.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) = -1.6 \times 10^3\ \text{J}$$

والشغل الكلي المبذول بواسطة الغاز وهو -1.6×10^3 J حيث تعني الإشارة السالبة أن $+1.6 \times 10^3$ J من الشغل قد بُذِل على الغاز.

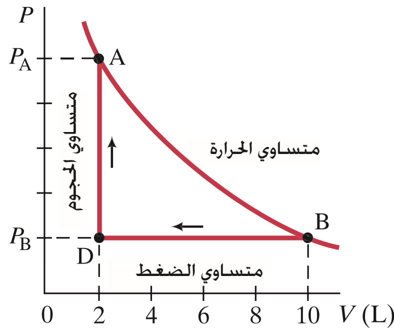
(ب) بما أنّ درجة الحرارة متساوية عند بدء العملية BDA ونهايتها، فلن يحصل أيُّ تغيُّرٍ في الطاقة الداخلية : $\Delta U = 0$. ومن القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية فإنّ :

$$0 = \Delta U = Q - W$$

ولذلك:

$$Q = W = -1.6 \times 10^3\ \text{J}$$

وبما أنّ Q سالبة، فإنّ 1600 J من الحرارة سينساب إلى خارج الغاز خلال العملية الكلية BDA.



الشكل 15 – 8 (مثال 15 - 5).

التمرين جـ: في (المثال 15 – 5)، إذا كانت الحرارة المفقودة من الغاز خلال العملية BD 8.4×10^3 J، فما التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال العملية BD؟

أمثلة إضافية

المثال 15-6 الشغل المبذول داخل آلة.

يتمدد 0.25 moles من الغاز المثالي أحادي الذرة بسرعة مع ثبات حرارته داخل أسطوانة آلة. وخلال هذه العملية، تُدفع الذراع، وتنخفض درجة حرارة الغاز من 1150 K إلى 400 K. فما مقدار الشغل الذي يبذله الغاز؟

النهج: نفترض الغاز نظامنا (أما الذراع فيعدّ جزءاً من محيطه الخارجي). وبما أن الضغط غير ثابت، فلن نستطيع استخدام (المعادلة 15 – 3). وبدلاً من ذلك سنستخدم القانون الأول في الديناميكا الحرارية لأنه يمكن تحديد ΔU بدلالة $Q = 0$ (عملية كظمية).

الحل : يتم تحديد ΔU من (المعادلة 14 – 1) لإيجاد الطاقة الداخلية للغاز المثالي أحادي الذرة:

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_f - U_i = \tfrac{3}{2} nR(T_f - T_i)\\ &= \tfrac{3}{2}(0.25\ \text{mol})(8.314\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(400\ \text{K} - 1150\ \text{K})\\ &= -2300\ \text{J}.\end{aligned}$$

وعليه، من القانون الأول في الديناميكا الحرارية (المعادلة 15–1) فإنّ:

$$W = Q - \Delta U = 0 - (-2300\ \text{J}) = 2300\ \text{J}$$

المثال 15-7 ΔU **لتحول الماء المغلي إلى بخار.**

حدّد التغير في الطاقة الداخلية لـ 1.00 liter من ماء (كتلته 1.00 kg) عند 100°C عندما يتحول من سائل إلى غاز لينتج من ذلك 1671 liter من البخار عند 100°C افترض أن العملية جرت عند الضغط الجوي المعياري

النهج: الماء هنا هو نظامنا. ولا تُسبّبُ الحرارة الضرورية هنا أي ارتفاع في درجة الحرارة، ولكنها تغير في طور المادة أو حالتها. ونستطيع تحديد الحرارة Q الضرورية باستخدام حرارة الماء الكامنة كما في (البند 15 – 5). أما قيمة الشغل الذي سيبذل فهي: $W = P\,\Delta V$. إذن، سيعطي القانون الأول في الديناميكا الحرارية ΔU.

الحل: إن حرارة التبخر الكامنة للماء (الجدول 14 – 3) هي $L_V = 22.6 \times 10^5\,\text{J/kg}$، والحرارة الضرورية اللازمة لهذه العملية هي:

$$Q = mL = (1.00\,\text{kg})(22.6 \times 10^5\,\text{J/kg}) = 22.6 \times 10^5\,\text{J}$$

أمّا الشغل المبذول بواسطة الماء (المعادلة 15 – 3) فهو:

$$W = P\,\Delta V = (1.01 \times 10^5\,\text{N/m}^2)[(1671 \times 10^{-3}\,\text{m}^3) - (1 \times 10^{-3}\,\text{m}^3)] = 1.69 \times 10^5\,\text{J},$$

حيث استخدمنا $1\,\text{atm} = 1.01 \times 10^5\,\text{N/m}^2$ و $1\,\text{L} = 10^3\,\text{cm}^3 = 10^{-3}\,\text{m}^3$.

وعليه:

$$\Delta U = Q - W = (22.6 \times 10^5\,\text{J}) - (1.7 \times 10^5\,\text{J}) = 20.9 \times 10^5\,\text{J}.$$

ملحوظة: تعمل معظم الحرارة المضافة على زيادة الطاقة الداخلية للماء (زيادة الطاقة الجزيئية للتغلب على التجاذب الذي يربط الجزيئات القريبة بعضها إلى بعض في الحالة السائلة). ويستخدم جزء صغير فقط ($< 10\%$) لعمل شغل.

التمرين د: (المعادلة 14 – 1)، $U = \frac{3}{2}nRT$ تبين أن $\Delta U = 0$ في (المثال 15-7) وذلك لأن $\Delta T = 0$. و على الرغم من ذلك فقد حددنا ان $\Delta U = 21 \times 10^5\,\text{J}$. أين الخطأ؟

* 15-3 الأيض في الإنسان والقانون الأول

تطبيق الفيزياء
الطاقة في الجسم البشري

تبذل الكائنات الحية جميعها كالإنسان والحيوان شغلاً. ويبذل الإنسان الشغل عندما يمشي أو يركض أو يرفع حملاً ثقيلاً. وهذا الشغل يتطلب طاقة، حيث تعدّ هذه الطاقة ضرورية للنمو لعمل خلايا جديدة، واستبدال الخلايا القديمة الميتة. ويشار إلى العمليات العديدة لتحويل الطاقة والتي تحدث خلال الكائنات الحية بالأيض.

ونستطيع تطبيق القانون الأول في الديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W$$

لأي كائن حي، ولنقل للجسم البشري. ويبذل الجسم الشغل خلال نشاطاته المتنوعة. ولكي لا ينجم عن ذلك نقصان في الطاقة الداخلية للجسم (ولدرجة حرارته أيضاً) فيجب أن تُضاف الطاقة بطريقة ما للتعويض. ومع هذا، فإنّ الطاقة الداخلية للجسم لا يمكن المحافظة عليها عن طريق انسياب الحرارة Q إلى داخله. والوضع الطبيعي للجسم البشري أن يبقى عند درجة حرارة أعلى من محيطه الخارجي. وعليه، فإنه من الطبيعي أن تنساب الحرارة منه إلى الخارج. وفي الأيام شديدة الحرارة عندما يمتص الجسم الحرارة، عندها لا توجد أي طريقة للجسم لكي يوظف هذه الحرارة أو يستفيد منها في عملياته الحيوية. ويبقى السؤال الأهم: ما مصدر الطاقة الذي يمكّننا من بذل الشغل؟ والحل هو الطاقة الداخلية (الطاقة الكيميائية الكامنة) المختزنة في الطعام (الشكل 15–9). وتتحوّل الطاقة الداخلية في النظام المغلق فقط نتيجة لانسياب الحرارة أو لبذل شغل. أما في النظام المفتوح، وعندما نتناول الطعام، فإنّنا نأتي بالطاقة إلى داخل أجسادنا مباشرة، حيث تعمل على زيادة الطاقة الداخلية الكلية U. وفي النهاية، تتحول هذه الطاقة إلى شغل وحرارة تنساب في الجسد حسب القانون الأول.

الشكل 15 – 9 تتزود راكبة الدراجة بالطاقة المدخلة.



إنّ المعدّلَ الأيضيَّ هو معدّلُ انتقال الطاقة الداخلية خلال الجسم. وغالبًا ما يُوصف بدلالة كيلو سعر/ساعة أو بالواط. ويعطي (الجدول 15 – 2) معدلات أيضية لنشاطات بشرية اعتيادية لشخصٍ متوسّط بالغ كتلته 65 كغم.

المثال 15-8 الشغل المبذول داخل آلة.

ما مقدار الطاقة المتحوّلة خلال 24 ساعة من قِبل شخص ما كتلته 65 كغم إذا قضى 8.0 ساعات نائماً و1.0 ساعة بعمل جسماني معتدل، و 4.0 ساعات في نشاطات خفيفة، و 11.0 ساعة في العمل المكتبي أو الاسترخاء؟

النهج: تعادل الطاقة المتحولة خلال أي نشاط المعدل الأيضي (الجدول 15-2) مضروباً بالزمن.

الحل: يعطي (الجدول 15 – 2) المعدل الأيضي بدلالة الواط (جول/ثانية). وبما أنّ الساعة تساوي 3600 ثانية، فإن الطاقة الكلية المتحولة هي:

$$\left[\begin{array}{l}(8.0\,\text{h})(70\,\text{J/s}) + (1.0\,\text{h})(460\,\text{J/s}) \\ + (4.0\,\text{h})(230\,\text{J/s}) + (11.0\,\text{h})(115\,\text{J/s})\end{array}\right](3600\,\text{s/h}) = 1.15 \times 10^7\,\text{J}.$$

ملحوظة : بما أن $1\ \text{kcal} = 4.186 \times 10^3\ \text{J}$ سعر فهذا مكافئ لـ 2800 kCal. وتناول طعام مكافئ لـ 2800 Cal سيعوض الطاقة الناتجة. وعليه، فإنّ شخصاً كتلته 65 kg ويرغب في فقدان وزن يجب أن يأكل أقلَّ من 2800 Cal في اليوم ، أو عليه أن يزيد من مستوى نشاطه.

الجدول 15 – 2
معدلات الأيض (إنسان كتلته 65 كغم)
المعدل الأيضي (بالتقريب)

النشاط	watts	kcal/h
		كيلو سعر
النوم	70	60
الجلوس السوي	115	100
نشاط خفيف (الأكل و اللبس والواجبات المنزلية	230	200
شغل متوسط (لعب التنس والمشي)	460	400
الركض (15كم/س)	1150	1000
ركوب الدراجة(السباق)	1270	1100

15-4 القانون الثاني في الديناميكا الحرارية– مقدمة

يخبرنا القانون الأول في الديناميكا الحرارية أنّ الطاقة محفوظة. ومع هذا، فهناك عمليّاتٌ كثيرةٌ يمكنها أن تحفظ الطاقة ولكنّها لا تحدث في الطبيعة. فعلى سبيل المثال، عند ملامسة جسمٍ حارٍّ لجسمٍ باردٍ فإنّ الحرارة ستنساب من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد، ولن يحدث العكس نهائياً من تلقاء نفسه . ومع أنّ الطاقة ستحفظ لو انسابت الحرارة من الجسم الأبرد إلى الجسم الأسخن، إلا أن هذه العملية لا تحدث تلقائيًّا.* وكمثال آخر، خذ بالحسبان ما يحدث عند إلقاء صخرة نحو الأسفل لتصطدم بالأرض. إن طاقة الصخرة الكامنة ستتحول إلى طاقة حركية خلال سقوط الصخرة. وعند اصطدام الصخر بالأرض، فإن هذه الطاقة ستتحول إلى طاقة داخلية في الصخرة وفي منطقة التصادم المجاورة، مّما يحفز جزيئات الصخرة على التحرك بسرعة أكبر لترتفع درجة حرارة الصخرة قليلاً. ولكن، هل شاهدت حدوث العكس – تقفز صخرة راكدة على الأرض فجأة إلى الأعلى في الهواء لأن طاقة جزيئاتها الحرارية قد تحولت إلى طاقة حركية ؟ ومع أن الطاقة ستكون محفوظة في هذه العملية، إلا أننا لن نرى حدوثها أبداً.

وهناك أمثلة أخرى كثيرة عن عمليات من الممكن أن تحدث في الطبيعة وليس عكسها. وهناك مثالان آخران: (1) إذا وضعت طبقة من الملح في إناء ثم غطيتها بطبقة من الفلفل المطحون فستحصل على خليط من الملح والفلفل. ولو حاولت بعد ذلك فصل مكونات الخليط إلى طبقتين منفصلتين من الملح والفلفل كما في السابق، فلن تستطيع ذلك وإن استغرقت زمناً طويلاً جداً في الهز. (2) تنكسر أكواب القهوة والزجاج تلقائياً عند إلقائها أرضاً. ولن تعود إلى ما كانت عليه قبل الكسر تلقائياً (الشكل 15 – 10) . ولن ينتهك القانون الأول في الديناميكا الحرارية (حفظ الطاقة) ولو أن أي من هذه العمليات السابقة قد حدث في الاتجاه المعاكس. ولتفسير هذه الحالات غير القابلة للتحقق في الاتجاه المعاكس، قام العلماء في النصف الثاني من القرن التاسع عشر بصياغة مبدأ جديد يعرف بالقانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

*ونعني بالتلقائي بأنها تحدث من تلقاء نفسها دون الحاجة إلى أي شغل مدخل من أي نوع. (تقوم الثلاجة بنقل الحرارة من المحيط البارد إلى المحيط الأكثر دفئاً فقط بعد بذل الشغل).



(أ) الحالة الإبتدائية. (ب) لاحقاً: يعود الكوب صحيحاً ويرتفع إلى الأعلى. (جـ) لاحقاً أيضاً: يستقر الكوب على الطاولة.

الشكل 15 – 10 هل لاحظت هذه العملية، كوب مكسور يعود تلقائياً صحيحاً ويرتفع بمفرده إلى سطح الطاولة؟

يُعدّ **القانون الثاني في الديناميكا الحرارية** بياناً حول العمليات التي تحدث في الطبيعة والتي لا يمكن أن تحدث. ويمكن لهذه العبارة أن تصاغ بعدة طرق متكافئة. ومن هذه العبارات صياغة "كلاوسياس" (1822 – 1888) وهي:

يمكن للحرارة أن تنساب تلقائيًا من الجسم الساخن إلى الجسم البارد، ولا يمكن أن تنساب تلقائيًا من الجسم البارد إلى الجسم الساخن.

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (عبارة كلاوسياس)

ومع أنّ هذه العبارة تنطبق على عملية واحدة بعينها، فليس واضحاً كيف يمكن لها أن تنطبق على العمليات الأخرى. لذا، هناك ضرورة واضحة لصياغة أخرى للقانون بعبارة أشمل وأعم تضم العمليات الممكنة جميعها بصورة أكثر وضوحاً.

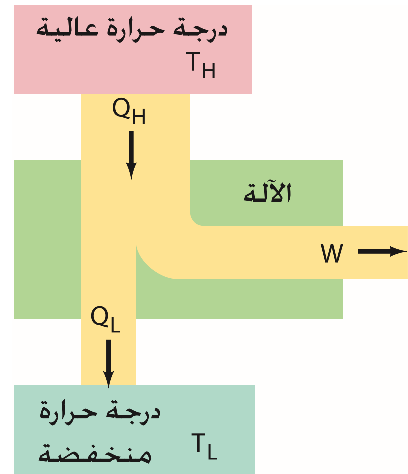
وتم الاعتماد على دراسة الآلات الحرارية لتطوير عبارة عامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. إنّ الآلة الحرارية هي أي جهاز قادر على تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي مثل الآلات البخارية وآلات السيارات. وسوف نختبر الآن الآلات البخارية من وجهة النظر العملية، ومن حيث أهميتها في تطوير القانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

الآلة الحرارية

5-15 الآلات الحرارية

إنّ تولد طاقة حرارية نتيجة بذل شغل يُعدّ أمرًا سهلًا. وقد يحدث هذا على سبيل المثال عند دلك يديك بعضهما ببعض بسرعة، أو عن طريق أي عملية احتكاك أخرى. ولكنّه من الصعب عمل عكس ذلك؛ أي أنّ تحصل على شغل من الطاقة الحرارية. ولقد تم اختراع آلة عملية تقوم بذلك في القرن الثامن عشر عند تطوير الآلة البخارية.

والفكرة الأساسية وراء أيّ آلة بخارية هي إمكانية الحصول على الطاقة الميكانيكية من الطاقة الحرارية، وقد يحدث هذا فقط عندما يسمح للحرارة بالانسياب من درجة حرارة مرتفعة إلى درجة حرارة منخفضة. وخلال هذه العملية، يتحوّل جزء من الحرارة إلى شغل ميكانيكي كما هو مبين في مخطط الرسم البياني في (الشكل 15 – 11). وما يثير الاهتمام هو الآلات القادرة على العمل لدورات متتابعة (أي عندما يكون النظام قادرًا على العودة إلى نقطة البداية باستمرار). ويكون التغيير في الطاقة الداخلية للنظام $\Delta U = 0$ بسبب عودته إلى نقطة البداية. وعليه، فإن جزءًا من الحرارة المدخلة Q_H عند درجة الحرارة المرتفعة T_H سيتحوّل إلى شغل W وجزءًا آخر سيصرف كحرارة نحو الخارج Q_L عند درجة حرارة منخفضة T_L (الشكل 15 – 11). ونتيجة لحفظ الطاقة، فإن $Q_H = W + Q_L$. وتسمى درجتا الحرارة المرتفعة والمنخفضة T_H و T_L بدرجتي حرارة التشغيل للآلة. لاحظ الآن بتمعن بأننا نستخدم اصطلاحًا جديدًا لنظام الإشارات حيث سنفترض كلًا من Q_L، Q_H و W موجبة دائمًا. وسنوضح اتجاه كلّ تحول في الطاقة في المخطط المعني كما هو مبيّن في (الشكل 15 – 11).



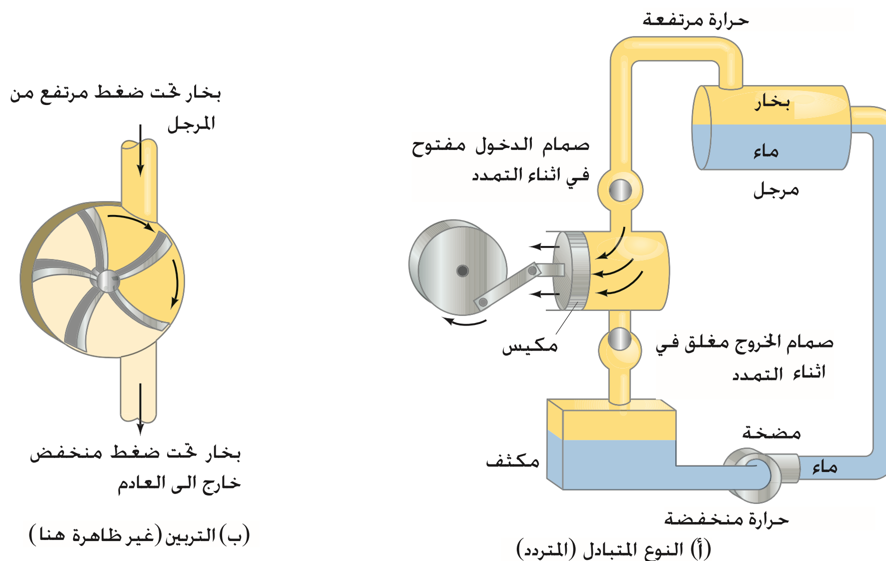
الشكل 15 – 11 مخطط رسم بياني لانتقال طاقة آلة حرارية.

تنويه:
اتفاقية جديدة للإشارات
$Q_H > 0, Q_L > 0 , W > 0$

الآلة البخارية وآلة الاحتراق الداخلي

لقد تمّ إيضاح طريقة عمل الآلة البخارية في (الشكل 15 – 12). وهناك نوعان من الآلات البخارية كلٌّ منهما يستعمل البخار المسخن الناجم عن احتراق الفحم والزيت

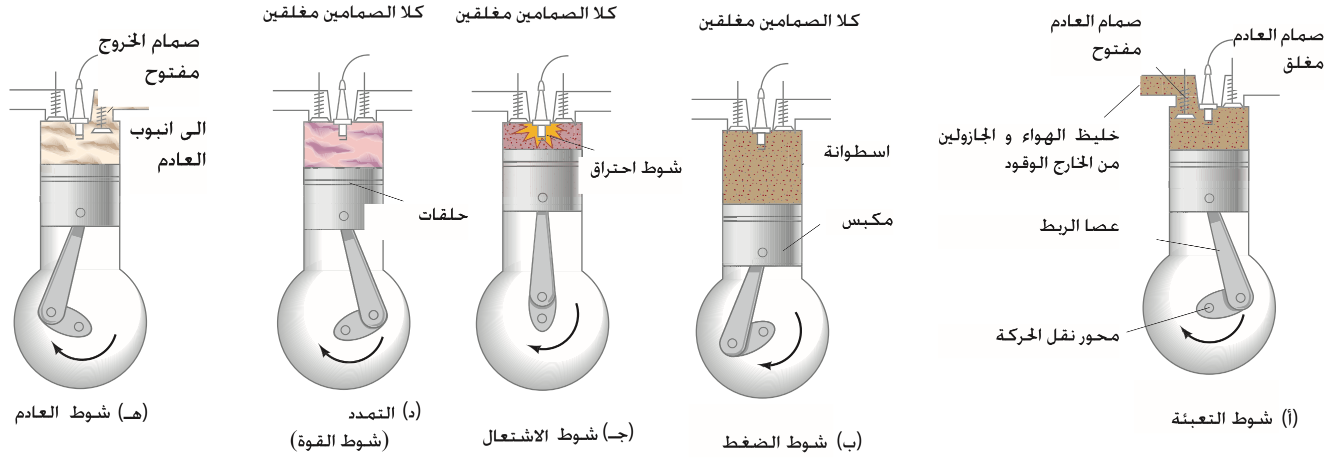
تطبيق الفيزياء
الآلات



الشكل 15 – 12 الآلات البخارية

والغاز أو الطاقة النووية. ويمرُّ البخار المسخّن في الآلة البخارية من النوع المتبادل كما في (الشكل 15 – 12أ) خلال صمّام السحب، ويتمدّد فيدفع المكبس لإجباره على الحركة. وعندما يرتد المكبس إلى موضعه الأصلي، يدفع الغاز إلى خارج صمام العادم. وتبقى طريقة العمل في المحرك البخاري كما في (الشكل 15 – 12ب) هي الطريقة السابقة نفسها مع استعمال عجلة تحريك بمحرك دوراني يشبه عجلة تجديف ذات شفرات عديدة، علمًا بأنّ معظم الكهرباء المولدة في أيامنا هذه تستخدم المحركات البخارية.* وتُسَمّى المادة التي تبرد وتسخن (البخار في هذه الحالة) بالمادة العاملة. ويتم الحصول على درجة الحرارة المرتفعة في الآلة البخارية عن طريق حرق الفحم أو النفط، أو أي مصدر آخر للوقود القادر على تسخين البخار.

وفي آلة الاحتراق الداخلي (المستخدمة في معظم الحافلات)، يتم الوصول إلى درجة الحرارة المرتفعة عن طريق حرق مزيج الوقود – الهواء داخل أسطوانة (يتم إشعاله بواسطة شمعة إشتعال) كما هو موضح في (الشكل 15 – 13).



الشكل 15 – 13 آلة احتراق داخلي تعمل بدورة من أربعة أشواط: (أ) ينساب مزيج الوقود - الهواء إلى داخل الأسطوانة بعد حركة المكبس نحو الأسفل. (ب) يتحرك المكبس إلى الأعلى ليضغط الغاز. (جـ) لحظة اطلاق شرارة شمعة الاشتعال واحتراق مزيج الوقود –الهواء والمضغوط بشدة لترتفع درجة حرارته لدرجة عالية. (د) تصبح الغازات الآن عند درجة حرارة مرتفعة وضغط مرتفع فتتمدد خلف المكبس. (هـ) تُدفع الغازات المحترقة إلى أنبوب العادم، وعند وصول المكبس إلى القمة يغلق صمام العادم ويفتح صمام السحب، و تعود الدورة لتتكرر مرة أخرى. وتمثل (أ) و(ب) و(د) و(هـ) الأربعة أشواط .

لماذا تحتاج الآلة البخارية إلى ΔT لتعمل؟

سنختبر الآلة البخارية الآن لنرى ضرورة الاختلاف في درجات الحرارة لعمل مثل هذه الآلات.ولنفترض في الآلة المتبادلة على سبيل المثال عدم وجود مكثف أو مضخة (الشكل 13–12أ) وأنّ البخار سيبقى عند درجة الحرارة نفسها خلال النظام ككل. وهذا سيعني أن ضغط الغاز العادم هو نفسه ضغط الغاز المسحوب إلى الداخل. وعليه، وبالرغم من أنّ الغاز سيبذل شغلاً على المكبس خلال تمدده، إلّا أنّه يجب على المكبس أن يبذل شغلاً مساوياً لإرغام المكبس على دفع البخار إلى العادم، وفي النتيجة تكون محصلة الشغل الكلي صفراً. أمّا في الآلات الحقيقية، فإن غاز العادم يبرد إلى درجة حرارة أقل ويتكاثف فيصبح ضغطه أقل من ضغط الغاز المدخل . لذا، فإن الشغل الذي سيبذله المكبس في طرد الغاز العادم إلى الخارج سيكون أقل من الشغل المبذول بواسطة الغاز ضد المكبس خلال حركة الغاز إلى الداخل . ويترتب على ذلك فرق في الشغل المبذول مرتبط بالفرق في درجات الحرارة . وبالمثل في المحركات الغازية، فإذا لم يبرد الغاز، فإن الضغط على جانبي الفراشات سيصبح متساويًا. أمّا عند تبريد الغاز من جهة العادم، فإنّ الضغط على الجانب الخلفي للفراشات سيقل مما يعمل على دوران المحرك.

* وحتى محطات الطاقة النووية تستخدم المحركات البخارية. ويعمل الوقود النووي– اليورانيوم – كوقود لتسخين البخار.

الكفـــاءة

يمكن تعريف **الكفاءة**، e، لأيِّ آلةٍ حراريّةٍ على أنّها نسبة الشغل W الذي تبذله الآلة إلى الحرارة المدخلة Q_H عند درجة الحرارة المرتفعة (الشكل 15 – 11):

$$e = \frac{W}{Q_H}.$$

وهذا تعريف منطقي حيث W هي الناتج (ما تحصل عليه من الآلة) أمّا Q_H فهي ما يدخل إليها وتدفع ثمنه على شكل وقود محترق. وبما أن الطاقة محفوظة، فيجب أن تعادل الحرارة المدخلة Q_H مقدار الشغل المبذول بالإضافة إلى الحرارة المنسابة إلى الخارج (Q_L) عند درجة الحرارة المنخفضة:

$$Q_H = W + Q_L$$

لذا، $W = Q_H - Q_L$. وتصبح كفاءة الآلة:

كفاءة أي آلة حرارية

$$e = \frac{W}{Q_H} \qquad \text{(15 – 4 أ)}$$

$$= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \qquad \text{(15 – 4 ب)}$$

ولجعل الكفاءة كمية مئوية؛ نضرب (المعادلة 15 – 4) في 100. ولاحظ أنه يمكن للكفاءة e أن تعادل 1.0 (أو 100%) فقط عندما تكون Q_L تساوي الصفر – أي أنه في حالة عدم صرف أيِّ حرارةٍ للمحيط الخارجي.

المثال 15-9 **كفاءة السيارة.**

تصل كفاءة محرك السيارة إلى 20%، وتنتج بالمتوسط شغلًا ميكانيكيًّا يعادل 23,000 J خلال كلّ ثانية من عملها. (أ) ما مقدار الحرارة المدخلة الضرورية؟ (ب) ما مقدار الحرارة المنسابة إلى خارج الآلة خلال الثانية؟

النهج: نريد الحصول على الحرارة المدخلة Q_H وكذلك على الحرارة المنسابة إلى الخارج Q_L، علماً بأن $W = 23{,}000\ J$ خلال كل ثانية والكفاءة $e = 0.20$. ونستطيع استخدام تعريف الكفاءة حسب (معادلة 15 – 4) بشكليها لإيجاد Q_H أولاً ومن ثمّ إيجاد Q_L.

الحل : (أ) من (المعادلة 15 – 4) فإن $e = W/Q_H$ ونحل لإيجاد Q_H :

$$Q_H = \frac{W}{e} = \frac{23{,}000\ J}{0.20}$$
$$= 1.15 \times 10^5\ J = 115\ kJ$$

أي أن الآلة تحتاج إلى $115\ kJ/s = 115\ kW$ من الحرارة المدخلة.

(ب) ونستخدم الجزء الثاني من (المعادلة 15 – 4): $(e = 1 - Q_L/Q_H)$ للحصول على Q_L :

$$\frac{Q_L}{Q_H} = 1 - e$$

أي:

$$Q_L = (1 - e)Q_H = (0.80)115\ kJ$$
$$= 92\ kJ$$

وتخرج الآلة الحرارة إلى محيطها الخارجي بمعدل $92\ kJ/s = 92\ kW$.

ملحوظة: إنّ 23 kJ من الحرارة الكلية المدخلة إلى الآلة 115 kJ فقط قادرة على بذل شغلٍ مفيدٍ. في حين يتم هدر 92 kJ كحرارة مخرجة.

ملحوظة: لقد تم التعامل مع هذا السؤال بدلالة الطاقة لكل وحدة زمن. وكان من الممكن أن نتعامل مع السؤال بدلالة القدرة ببساطة حيث $1\ J/s = 1\ W$.

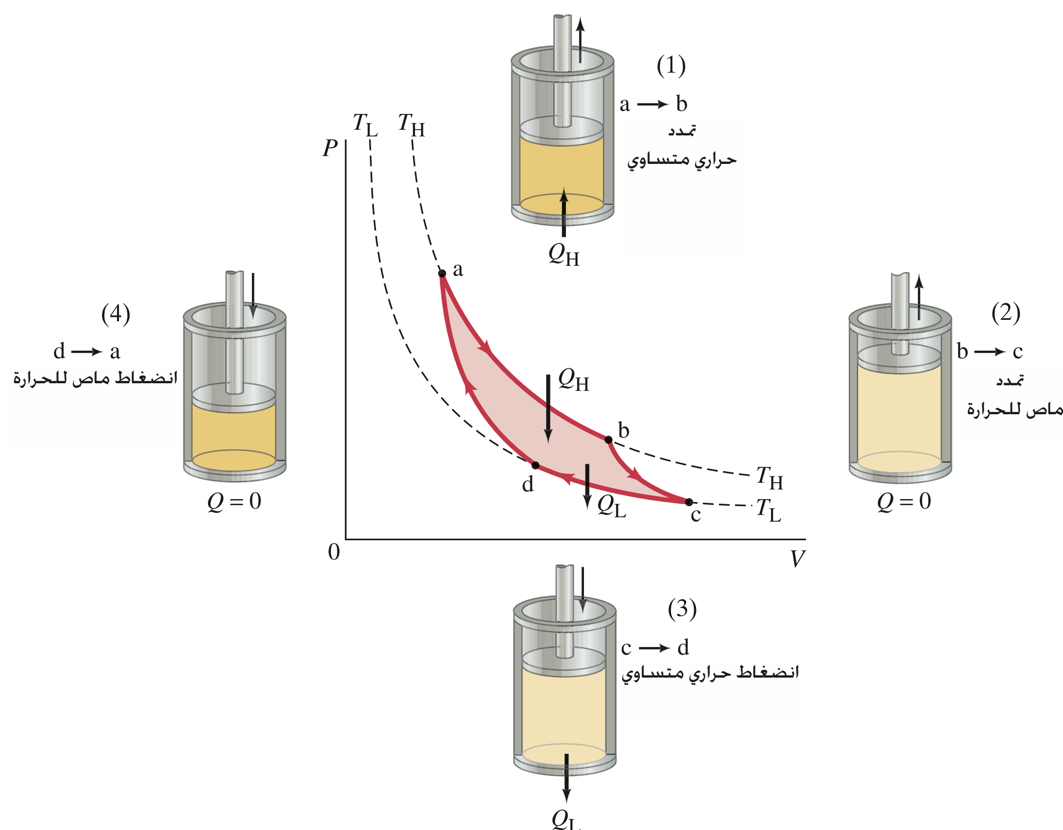
آلة كارنو

آلة (كارنو) المثالية

فحص العالم الفرنسي كارنو (1796 – 1832) ميزات الآلة المثالية (تُعرف الآن بآلة كارنو) ليرى كيفية رفع كفاءتها. ومع أنّ آلة كارنو غير موجودة في الواقع، إلاّ أنّها قامت بدور مهم كفكرة نظرية في تطور الديناميكا الحرارية.

وتتكون آلة كارنو المثالية من دورة مكونة من أربع عمليات: اثنتين منهما كظميتين $(Q = 0)$ واثنتين أحاديتي الحرارة $(\Delta T = 0)$. وتظهر هذه الدورة في (الشكل 15 – 14). واعتبرت كل عملية من هذه العمليات الأربع قابلة للتطبيق عكسياً. أي أن كل عملية من هذه العمليات الأربع تمت ببطء شديد لدرجة يمكن اعتبار النظام في وضع الاتزان عند كل لحظة، وعند عكس اتجاه العملية، فإنّ مقدار الشغل الضروري بذله وكمية الحرارة المتبادلة لا يتغيران نهائياً. وعلى الوجه الآخر، فهذا لا يحدث خلال العملية الحقيقية؛ لأنّ العملية تحدث بسرعة أكبر، وتحدث اضطرابات في الغاز، وهناك احتكاك، وهكذا دواليك . وبسبب هذه العوامل، لا يمكن إجراء العملية في الاتجاه المعاكس دون حدوث اضطرابات في الغاز وفقدان جزء من الطاقة الحرارية خلال الاحتكاك. ولهذا، لا يمكن للعمليات الحقيقية إلا أن تكون **غير عكسية**.

الشكل 15 -14 دورة كارنو. تعمل الآلات الحرارية في دورات. وتبدأ دورة آلة كارنو عند النقطة a على المخطط PV. (1) يتمدد الغاز أولاً عند درجة حرارة ثابتة، وتضاف طاقة حرارية Q_H خلال المسار ab عند درجة حرارة T_H. (2) يتمدد الغاز كظمياً من b إلى c دون تبادل حرارة مع انخفاض درجة الحرارة إلى T_L. (3) يتقلص الغاز عند درجة حرارة ثابتة T_L خلال المسار cd وتنساب الحرارة Q_L نحو الخارج. (4) أخيراً، يتقلص الغاز كظمياً خلال المسار da إلى حجمه الأصلي كما كان أولاً.



أثبت كارنو أنّ الحرارة Q_H و Q_L لآلة مثالية عكسية تتناسب مع درجتي حرارة التشغيل T_H و T_L (بدلالة كلفن). لذلك، يمكن التعبير عن الكفاءة كما يلي :

كفاءة كارنو (المثالية)

$$e_{ideal} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}. \quad \text{[كفاءة كارنو (المثالية)]} \; \mathbf{(15-5)}$$

تعبّرُ (المعادلة 15 – 5) عن الحد الأعلى الأساسي للكفاءة. إنّ الآلات الحقيقية تمتلك دائمًا كفاءة أقلّ من هذه بسبب الاحتكاك وما شابهه. وتصل كفاءة الآلات الحقيقية رفيعة التصميم من حوالي 60 إلى 80% من كفاءة كارنو.

المثال 15-10 كفاءة الآلة البخارية.

تعمل آلة بخارية بين درجتي حرارة 500°C و 270°C. فما أعلى كفاءة ممكنة لهذه الآلة؟

النهج: إن أعلى كفاءة ممكنة هي التي تمتاز بها آلة كارنو المثالية حسب (المعادلة 15 – 5). ويجب أن تُستخدم درجات الحرارة بدلالة الكلفن.

الحـل : نحوّل أولاً درجات الحرارة إلى الكلفن بإضافة 273 إلى درجات الحرارة المئوية : $T_H = 773\ \text{K}$ و $T_L = 543\ \text{K}$. وعليه:

$$e_{ideal} = 1 - \frac{543}{773} = 0.30.$$

وللحصول على كفاءة مئوية: نضرب في 100. وعليه، فإنّ الكفاءة العظمى (أو كفاءة كارنو) هي 30%. وفي الواقع، من الممكن لكفاءة آلة حقيقية أن تصل إلى 0.70 من هذه القيمة أي 21%.

ملحوظة: لا تزال درجة حرارة العادم في هذا المثال مرتفعة، 270°C. وغالباً ترتب الآلات البخارية على التوالي بحيث يستخدم العادم من الآلة الأولى كمُدخلٍ إلى الآلة الثانية أو الثالثة.

المثال 15-11 إدعاء باطل!

يدّعي صانع آلة أنّ الحرارة المدخلة إلى آلته خلال الثانية هي 9.0 كيلو جول عند 435 كلفن. وأن الحرارة الناتجة خلال كل ثانية هي 4.0 kJ عند 285 K. فهل تصدق هذا الادعاء؟

النهج: يمكن حساب كفاءة الآلة من التعريف في (المعادلة 15 –4)، ويجب أن تكون أقلّ من القيمة العظمى الممكنة حسب (المعادلة 15 – 5).

الحـل : تعطى كفاءة الآلة حسب الادعاء كالتالي :

$$e = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{9.0\ \text{kJ} - 4.0\ \text{kJ}}{9.0\ \text{kJ}} = 0.56.$$

ولكن القيمة العظمى الممكنة للكفاءة تعطى حسب كفاءة كارنو (معادلة 15 – 5) كما يلي :

$$e_{ideal} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = \frac{435\ \text{K} - 285\ \text{K}}{435\ \text{K}} = 0.34.$$

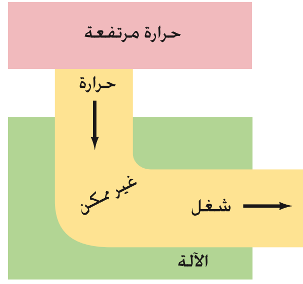
وعليه، فإنّ ادعاء الصّانع يتعارض مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، ولا يمكن تصديقه.

ويتضح من (المعادلة 15 – 5) أنّه لا يمكن الوصول إلى كفاءة 100% عند درجات الحرارة الاعتيادية، بل يعدّ هذا مستحيلا. ولن تتحقق هذه الكفاءة إلا عندما تكون درجة حرارة العادم T_L عند الصفر المطلق، ولكن الوصولٍ إلى الصفر المطلق من المستحيلات العملية (و النظرية أيضًا).*

* تقترح التجارب الدقيقة عدم القدرة على الوصول إلى الصفر المطلق. وهذا ما يعرف **بالقانون الثالث في الديناميكا الحرارية**.

وبسبب عدم وجود أيّ آلة ذات كفاءة 100%، نستطيع القول:
يستحيل إيجاد آلة يكون تأثيرها الوحيد هو تحويل مقدار ما من الحرارة كليًّا إلى شغل.
وهذا ما يعرف **بصيغة كلفن ـبلانك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية**. ويظهر (الشكل 15 – 15) مخطّطاً لآلة حرارية مثالية كاملة لا وجود لها على أرض الواقع. وإذا كان القانون الثاني في الديناميكا الحرارية غير صحيح، فعندها يمكن بناء الآلة المثالية الكاملة. ويمكن أن تحدث أشياء مثيرة. فعلى سبيل المثال، لو أنّ سفينة ما لا تحتاج إلى خزان ذي درجة حرارة منخفضة لتخرج الحرارة العادمة إليه، عندها ستصبح هذه السّفينة قادرة على الإبحار عبر المحيطات مستخدمة الطاقة الداخلية لماء المحيطات. وعندئذٍ لن نعاني من مشكلة توافر الوقود من عدمه.

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة كلفن-بلانك)

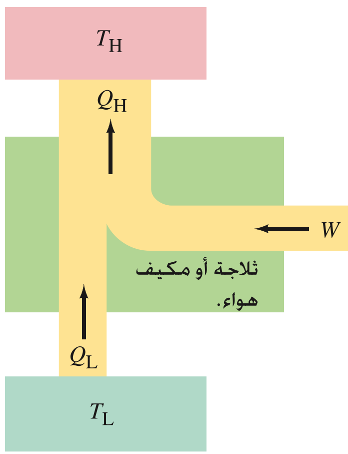


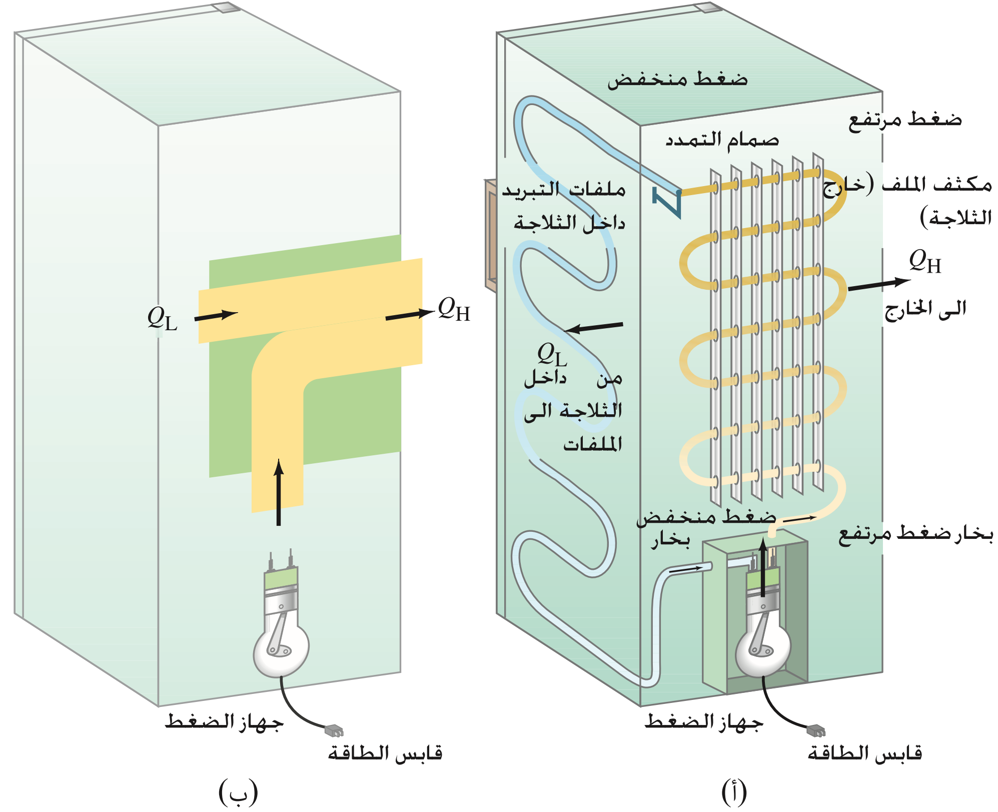
الشكل 15 – 15 مخطط لآلة حرارية كاملة مستحيلة حيث تستخدم خلالها الحرارة المدخلة كلها لعمل شغل.

6-15 الثلاجات ومكيفات الهواء ومضخات الحرارة

إنّ مبدأ عمل كل من الثلاجات ومكيفات الهواء ومضخات الحرارة هو العكس تماماً لمبدأ عمل الآلة الحرارية، حيث يعمل كل منها على نقل الحرارة من محيطه البارد إلى محيطه الدافيء. وكما هو مخطط في (الشكل 15 – 16) ونتيجة لبذل الشغل W، فإن كمية من الحرارة ستنقل من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة T_L (كتلك داخل الثلاجة) وتتخلص من كمية أكبر من الحرارة إلى منطقةٍ ذات درجة حرارة مرتفعةٍ T_H (أي إلى الغرفة). وتستطيع أن تشعر بهبوب الحرارة الساخنة عادةً من أسفل الثلاجة. وعادةً ما يبذل الشغل بواسطة محرك ضاغط كهربائي حيث يقوم بضغط الموائع كما هو مبيّن في (الشكل 15 – 17).

الشكل 16 – 15 رسم تخطيطي لانتقال الطاقة إلى ثلاجة أو مكيف هواء.





الشكل 17 – 15 (أ) نظام ثلاجة اعتيادي. يرغم محرك ضاغط كهربائي غازًا تحت ضغط عالٍ على المرور خلال مبادل حراري (مكثف) قرب الجدار الخلفي الخارجي للثلاجة حيث تفقد Q_H ويبرد الغاز ليصبح سائلاً. ثم يُمرر السائل من منطقة الضغط العالي خلال صمام إلى أنابيب ضغط منخفض تتوزع قرب جدران الثلاجة الداخلية، ويتبخر السائل عند هذا الضغط المنخفض ويبدأ بامتصاص الحرارة (Q_L) من داخل الثلاجة. ثمّ تعود الموائع إلى الضاغط لتبدأ الدورة مرة أخرى من جديد. (ب) رسم تخطيطي مشابه (للشكل 15 - 16).

تطبيق الفيزياء
الثلاجة

إنّ الثلاجة المثالية التي لا تحتاج إلى بذل أي شغل لنقل الحرارة من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة إلى المنطقة ذات درجة الحرارة المرتفعة، تُعدّ من المستحيلات.

وهذه هي **صيغة كلاوسياس للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية** والتي تم ذكرها في (البند 15 – 14)، ويمكن صياغتها بصورة اصطلاحية كالآتي:

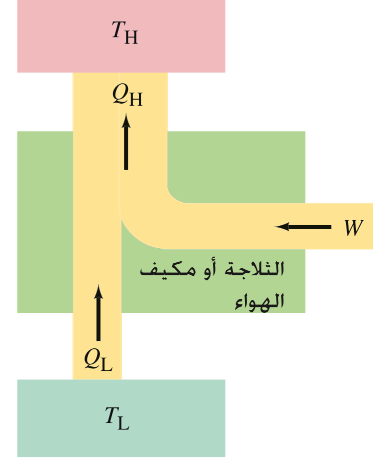
القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة كلاوسياس)

يستحيل إيجاد آلة يكون تأثيرها الوحيد هو نقل الحرارة من نظام ما درجة حرارته منخفضة T_L إلى نظام آخر درجة حرارته مرتفعة T_H.

ويجب بذل شغل لإرغام الحرارة على الانسياب من جسم (أو نظام) ذي درجة حرارة منخفضة إلى جسم أو نظام آخر ذي درجة حرارة مرتفعة. لذا، فإنّ الثلاجة المثالية لا وجود لها.

ويعرف **معامل أداء الثلاجة** (COP) على أنه الحرارة Q_L المزالة من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة (داخل الثلاجة) مقسومة على الشغل W المبذول لإزالة الحرارة (الشكل 15 – 16):

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_L}{W}$$ [الثلاجة ومكيف الهواء] **(15 – 6أ)**



الشكل 15 – 16 (معاد) رسم تخطيطي لانتقال الطاقة إلى ثلاجة أو إلى مكيف هواء.

ويُعدّ هذا منطقيًّا؛ لأنّه كلما ازدادت كميَّةُ الحرارة Q_L الممكن إزالتها من داخل الثلاجة مقابل قدرٍ معيَّن من الشغل المبذول أصبحت الثلاجة فاعلة أكثر وأفضل. وبما أن الطاقة محفوظة، نستطيع أن نكتب من القانون الأول في الديناميكا الحرارية: $Q_L + W = Q_H$ أو $W = Q_H - Q_L$ (أنظر الشكل 15 – 16). وعليه ستُصبِحُ (المعادلة 15 – 6أ) كالتالي:

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$ [الثلاجة ومكيف الهواء] **(15 – 6ب)**

ولثلاجة نموذجية (وليست مثالية مستحيلة) فإنّ أفضل معامل أداء يمكن الحصول عليه هو:

$$\mathrm{COP_{ideal}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$ [الثلاجة ومكيف الهواء] **(15 – 6جـ)**

وهي مكافئة لآلة (كارنو) النموذجية (معادلة 15 – 5).

تطبيق الفيزياء
مكيف هواء.

ويعمل **مكيف الهواء** بطريقة عمل الثلاجة نفسها، على الرّغم من اختلاف تفاصيل بنائهما: حيث يأخذ مكيف الهواء الحرارة Q_L من داخل الغرفة (أو المبنى) ذات درجة الحرارة المنخفضة ويرسل الحرارة Q_H إلى المحيط الخارجي ذي درجة الحرارة المرتفعة. وتصف (المعادلات 15 – 6) أيضاً معامل أداء مكيف الهواء.

المثال 15-12 **صناعة الثلج.**

برّادٌ مُعامِلُ أدائه 3.8 ويستخدم 200 W من القدرة. ما الزمن اللازم لعمل مكعبات ثلجية داخل وعاءٍ يحتوي على 600 g من الماء عند 0°C؟

النهج: من (المعادلة 15 –6ب)، تمثل Q_L الحرارة اللازم إزالتها من الماء لكي يُصبح ثلجاً. ولتحديد قيمة Q_L: يجب استخدام حرارة التجمد الكامنة للماء و(المعادلة 14 – 3) حيث $Q = mL$.

الحل: من (الجدول 14 – 3)، $L = 333\ \mathrm{kJ/kg}$. وعليه، فإن:

$$Q = mL = (0.600\ \mathrm{kg})(3.33 \times 10^5 \mathrm{J/kg}) = 2.0 \times 10^5\ \mathrm{J}$$

وهي الطاقة الكلية اللازم إزالتها من الماء. ويعمل البراد شغلا بمعدل $W/t = 200\ \mathrm{J/s} = 200\ \mathrm{W}$ ويعادل W وهو الشغل الذي يستطيع بذله خلال زمن t بالثواني. ونحل لإيجاد t: $t = W/(200\ \mathrm{Js})$. وللحصول على W فإننا نستعمل (المعادلة 15 –6ب): $W = Q_L/\mathrm{COP}$

$$t = \frac{W}{200\ \mathrm{J/s}} = \frac{Q_L/\mathrm{COP}}{200\ \mathrm{J/s}} = \frac{2.0 \times 10^5\ \mathrm{J}}{(3.8)(200\ \mathrm{J/s})} = 260\ \mathrm{s},$$

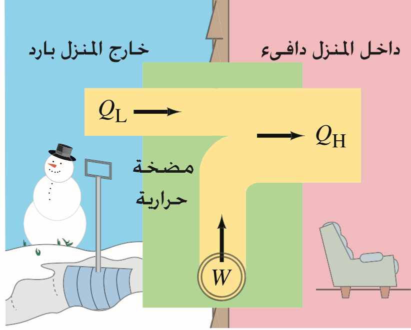
أو حوالي $4\frac{1}{2}$ min.

وتنساب الحرارة بشكل طبيعي من درجات الحرارة المرتفعة إلى درجات الحرارة المنخفضة. ويبذل كلٌّ من الثلاجة ومكيف الهواء شغلاً لإنجاز عكس ذلك: أي لجعل الحرارة تنساب من المنطقة الباردة إلى المنطقة الساخنة. ويمكن لنا أن نقول بأنهما يضخان الحرارة من المناطق الباردة إلى المناطق الساخنة. وهي عكس ميل الحرارة الطبيعي للانسياب من الأجسام الساخنة إلى الباردة، تماماً مثل ضخ المياه إلى أعلى تلة والمعاكس تماماً لميل المياه الطبيعي للانسياب أو السقوط إلى الأسفل.

يستعمل مصطلح **المضخّة الحراريّة** غالبًا للتعبير عن جهاز قادر على تسخين المنزل في الشتاء باستخدام محرك كهربائي قادر على بذل شغل لامتصاص الحرارة Q_L من المحيط الخارجي ذي درجة الحرارة المنخفضة ونقلها Q_H إلى داخل المنزل الساخن، انظر (الشكل 18 – 15). وكالثلاجة تمامًا، هناك مبادل خارجي وداخلي للحرارة (ملفات الثلاجة) ومحرّك ضاغط كهربائي. ويتشابه مبدأ عمل كلٍّ من الثلاجة ومكيف الهواء مع مضخة الحرارة، إلّا أنّ الهدف الأساس من عمل مضخة الهواء هو التسخين (إضافة Q_H) بدلاً من التبريد (إزالة Q_L). وعليه، فإن معامل الأداء للمضخة الحرارية يُعرف بطريقة مختلفة عن ذلك لمكيف الهواء؛ لأنّ الحرارة Q_H المضافة إلى داخل المنزل هي ما يهمنا الآن :

$$COP = \frac{Q_H}{W} \qquad \text{[المضخة الحرارية]} \qquad (7-15)$$

لذا، فإنّ COP أكبر من 1 بالضرورة. ويمكن عكس عمل المضخات الحرارية لتستخدم مكيفات للهواء خلال فترة الصيف



الشكل 18 – 15 تستخدم المضخة الحرارية محركاً كهربائياً لضخ الحرارة من الخارج البارد إلى داخل المنزل الدافيء.

تطبيق الفيزياء
المضخة الحرارية

المثال 15-13 المضخة الحرارية.

تمتلك مضخة حراريّة معامل أداء مقداره 3.0، وتصنف لبذل شغل بمعدل 1500 W. (أ) ما مقدار الحرارة القادرة على إضافتها إلى غرفةٍ ما في الثانية الواحدة؟ (ب) إذا عكس عمل المضخة لتعمل كمكيف للهواء خلال فترة الصيف، فما معامل أداء مكيف الهواء المتوقع مفترضًا بقاء القيم السابقة جميعها على حالها؟

النهج: نستخدم معامل الأداء مع مراعاة اختلاف تعريفه لكلا الحالتين (أ) و (ب).

الحل : نستخدم (المعادلة 15 – 7) للمضخة الحرارية. وبما أن الجهاز يبذل شغلاً مقداره 1500 J لكلّ ثانية فهو قادر على إضافة الحرارة إلى الغرفة بمعدل

$$Q_H = COP \times W = 3.0 \times 1500\ J = 4500\ J$$

لكل ثانية. أو بمعدل 4500 W.

(ب) وعندما يتم عكس عمل المضخة الحرارية لتعمل كمكيف للهواء خلال فترة الصيف، فإنّها ستسحب الحرارة Q_L من داخل المنزل وتبذل شغلاً مقداره 1500 J خلال كلّ ثانية، ومن ثم تطرد $Q_H = 4500\ J$ خلال كل ثانية إلى خارج المنزل الساخن. وبما أنّ الطاقة محفوظة، فإن $Q_L + W = Q_H$ (أنظر الشكل 15 – 18، ولكن مع عكس داخل المنزل بخارجه). وعليه:

$$Q_L = Q_H - W = 4500\ J - 1500\ J = 3000\ J$$

إذن، سيصبح معامل أداء مكيف الهواء كما يلي (المعادلة 15 – 6أ):

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{3000\ J}{1500\ J} = 2.0.$$

ملحوظة: يعرف معامل الأداء بصورة مختلفة لكلٍّ من المضخات الحرارية ومكيفات الهواء.

تنويه:
يعرف COP بطريقتين مختلفتين لكل من المضخات الحرارية ومكيفات الهواء.

يمكن للمضخات الحرارية أن توفر المال والطاقة في بعض الأحيان بالاعتماد على ثمن كلّ من كلفتها الأصلي وكلفة تركيبها. ونقارن على سبيل المثال بين المضخة الحرارية في (المثال 15 – 13) مع سخان حراري مصنف 1500-W. فعند إيصال السخان الكهربائي بمصدر فرق الجهد، فسيعمل على استهلاك 1500-W من الكهرباء وسيزود الغرفة بـ 1500-W من الحرارة. أما بالنسبة إلى المضخة الحرارية فستستهلك 1500-W من الكهرباء ولكنها ستزود الغرفة بـ 4500 W من الحرارة.

* **تصنيف SEER**

غالباً ما تخضع الأجهزة مثل الثلاجات ومكيفات الهواء لتصنيف يعرف بـ SEER (نسبة فعالية الطاقة الموسمية) والتي تعرف كالتالي:

تطبيق الفيزياء
تصنيف SEER

$$SEER = \frac{\text{(الحرارة المفقودة Btu)}}{\text{(ساعة-واط بدلالة المدخلات الكهربائي)}}$$

وتقاس عن طريق أخذ القيمة المتوسطة خلال (المواسم) الظروف المختلفة. إنّ تعريف SEER مشابه بالأساس لتعريف COP مع الاختلاف الواضح في الوحدات المستخدمة. حيث 1 Btu = 1055 J (انظر البند 14 – 1 ومسألة 4 في الفصل 14). وعليه، فإن SEER = 1 يُعادل COP = (1 Btu/1 W.h) =(1055 J)/(1 J/s × 3600 s) = 0.29 . أمّا COP = 1 فيُعادل SEER =1/0.29=3.4

15-7 القصور الحراري (الأنتروبي) والقانون الثاني في الديناميكا الحرارية

لقد رأينا عدّة جوانب من القانون الثاني في الديناميكا الحراريّة؛ ويمكن إثبات أنّ العبارات المختلفة التي وصفته متكافئة تمامًا. ولكن ما نحتاج إليه هو صيغة عامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. ولم يكن هذا ممكنًا حتى النصف الثاني من القرن التاسع عشر عندما أدخل كلاوسياس كمية تعرف بالقصور الحراري(الأنتروبي)عام 1860. ويُعدّ القصور الحراري بخلاف الحرارة دالة يصف حالة النظام. أي أنّ النظام في حالة ما سَيُعَرّف بدلالة كلٍّ من درجة حرارته، وحجمه، وضغطه، وقصوره الحراري أيضًا. وسوف نرى في البند التالي كيف يمكن تفسير قصور النظام الحراري كمقياس لدرجة ترتيب النظام أو عدم ترتيبه.

الانتروبيا

وعندما نتعامل مع قصور النظام الحراري- تمامًا مثلما نتعامل مع طاقة الوضع - فإنّ ما يهمّنا هو مقدار التغيّر في القصور الحراري خلال عملية ما وليست القيمة المطلقة له. وحسب مايراه كلاوسياس، فإنّ التغيّر في القصور الحراري S لنظامٍ ما عند إضافة كميّةٍ من الحرارة Q إلى النظام خلال عملية عكسية* أحاديّة الحرارة يُعطى كالتالي:

تغير الانتروبيا

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad (8-15)$$

وتُمثّل T درجة الحرارة بالكلفن.

المثال 15-14 تغير القصور الحراري نتيجة الانصهار.

أُخرج مكعب ثلجٍ كتلته 56 غم من غرفة تخزين درجة حرارتها $0°C$، ووُضع في كوبٍ ورقي. وبعد عدّةِ دقائق تحوّلت نصف كتلة مكعب الثلج إلى ماءٍ درجة حرارته $0°C$. أوجد التغير في القصور الحراري لكلّ من الثلج والماء.

النهج: سنفترض في البداية أن النظام يتكون من 56 g من الثلج. ولتحديد مقدار التغير في القصور الحراري، يجب علينا أن نحدد أولاً مقدار الحرارة الضرورية لصهر الثلج عن طريق استخدام حرارة التجمد الكامنة للماء: $L = 333\ kJ/kg$ (بند 14 – 5).

الحل: الحرارة الضرورية لصهر 28 g من الثلج (نصف كتلة مكعب الثلج) هي:

$$Q = mL = (0.028\ kg)(333\ kJ/kg) = 9.3\ kJ$$

وتبقى درجة الحرارة ثابتة خلال العملية. لذلك، نستطيع إيجاد التغير في القصور الحراري من (المعادلة 15– 8):

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{9.3\ kJ}{273\ K} = 34\ J/K$$

ملحوظة: لم يُحسبِ التغير في القصور الحراري للمحيط الخارجي (الهواء والكوب).

لقد كانت الحسابات في (المثال 15 – 14) سهلة؛ لأن درجة الحرارة كانت ثابتة. ولكن عندما تتغير درجة الحرارة خلال العملية، فسنحتاج إلى إضافة انسياب الحرارة خلال فترة تغير درجات الحرارة باستخدام الرياضيات أو الحاسوب. أما إذا كان التغير في درجات الحرارة غير كبير، فيمكننا عندئذٍ استخدام تقريب مناسب لمتوسط قيمة درجة الحرارة كما هو موضح في المثال الآتي.

المثال 15-15 تغير القصور الحراري بمزج المياه.

قَدّر التغير في القصور الحراري الناتج من مزج 50.0 kg من عينة ماء درجة حرارتها $20.00°C$ مع 50.0 kg من الماء درجة حرارتها $24.00°C$.

النهج: إنّ درجة الحرارة النهائية للماء هي $22.00°C$ حيث بدأنا بكميتين متساويتين من الماء. ونستخدم الحرارة النوعية للماء وطريقة المسعرية (البندان 14 – 13 و 14 – 4) لتحديد الحرارة المنقولة. ثم نستخدم متوسط درجة الحرارة لكل عينة من الماء لتقدير التغير في القصور الحراري ($\Delta Q/T$).

* العمليات الحقيقية غير عكسية. ولأن القصور الحراري هو متغير حالة، فإنه يمكن تحديد التغير في القصور الحراري ΔS لعملية غير عكسية عن طريق حساب ΔS لعملية عكسية بين الحالتين نفسيهما.

الحل: كمية من الحرارة مقدارها

$$Q = mc\,\Delta T = (50.0\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(2.00\,\text{C}^\circ) = 4.186\times10^5\,\text{J}$$

تنساب إلى خارج الماء الساخن فيبرد من 24°C إلى 22°C، وتنساب إلى داخل الماء البارد فيُسَخّن من 20°C إلى 22°C. وعليه، فإنّ التغير الكلي في القصور الحراري ΔS هو مجموع التغير في القصور الحراري للماء الساخن ΔS_H والتغير في القصور الحراري للماء البارد ΔS_C:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_C.$$

ونقدّر التغيّر في القصور الحراري فنكتب: $\Delta S = Q/T_{av}$، حيث تمثل T_{av} "متوسط" درجة الحرارة لكلّ عملية، ونعدّ قيمة التغير مقبولة لأنّ التغير في قيمة درجة الحرارة صغير. ونستخدم للماء الساخن متوسط درجة حرارة 23°C (296 K) وللماء متوسط درجة حرارة 21°C (294 K). إذن،

$$\Delta S_H \approx -\frac{4.186\times10^5\,\text{J}}{296\,\text{K}} = -1414\,\text{J/K}$$

وهذه القيمة سالبة لأن هذه الكمية من الحرارة قد انتقلت إلى الخارج حيث أضيفت إلى الماء البارد.

$$\Delta S_C \approx \frac{4.186\times10^5\,\text{J}}{294\,\text{K}} = 1424\,\text{J/K}.$$

ولاحظ هنا نقصان القصور الحراري للماء الساخن (S_H) لانسياب الحرارة خارج الماء الساخن. في حين يزداد القصور الحراري للماء البارد (S_C) بمقدار أكبر من سابقه. ويكون التغير الكلي في القصور الحراري كالتالي:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_C \approx -1414\,\text{J/K} + 1424\,\text{J/K} \approx 10\,\text{J/K}$$

ورأينا في (المثال 15 – 15) أن القصور الحراري لجزء من النظام قد قلّ، أمّا القصور الحراري لجزء آخر من النظام فقد زاد بمقدار أكبر، لتكون المحصلة النهائية للقصور الحراري للنظام ككل موجبة. وقد وُجِدَ أن هذه الحالة الخاصة (المثال 15 – 15) تنطبق على الحالات الأخرى التي تمّ اختبارها جميعها. أي أنّ القصور الحراري الكلي لنظام معزول يزداد في الحالات الطبيعية جميعها. ويمكن للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية أن يصاغ بدلالة القصور الحراري كالتالي: لا يمكن أبداً للقصور الحراري لنظام معزول أن يتناقص. ويمكن له فقط أن يبقى كما هو أو أن يزداد. ويمكن للقصور الحراري أن يبقى كما هو فقط خلال عملية (عكسية) نموذجية . ولأي عملية حقيقية، فإن التغير في القصور الحراري ΔS هو أكبر من الصفر:

لا يتناقص القصور الحراري للنظام المعزول أبداً.

$$\Delta S > 0 \qquad \textbf{(9 – 15)}$$

أما إذا كان النظام غير معزول، فإن التغير في القصور الحراري للنظام ΔS_s بالإضافة إلى التغير في القصور الحراري لمحيط النظام الخارجي ΔS_{env} يجب أن يساوي صفرا أو أكبر من الصفر :

$$\Delta S = \Delta S_s + \Delta S_{env} \geq 0 \qquad \textbf{(15 – 10)}$$

وتتحقق العلاقة $\Delta S = 0$ في العمليات النموذجية فقط. أمّا للعمليات الحقيقية، فإنّ $\Delta S > 0$. وبذلك تكون الصيغة العامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية كالتالي:

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية(صيغة عامة)

يزداد القصور الحراري الكلي لأي نظام بالإضافة إلى القصور الحراري لمحيطه الخارجي كنتيجة لأي عملية طبيعية.

وبالرغم من احتمال نقصان القصور الحراري لجزء من الكون (انظر المثال 15 – 15) إلاّ أنّ القصور الحراري لجزء آخر من الكون سيزداد بمقدار أكبر. لذا، فإن القصور الحراري الكلي سيزداد دائماً.

الآن، وبعد أن حصلنا على صيغة نهائية عامة تصف لنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية نكتشف بأنّ هذا القانون غير اعتيادي . وهو يختلف عن أي قانون آخر من قوانين الفيزياء التي تحتوي على التساوي في نصوصها (مثل $F = ma$) أو عن قوانين الحفظ (مثل حفظ الطاقة والزخم الخطي). ويقدم القانون الثاني في الديناميكا الحرارية كمية جديدة وهي القصور الحراري S، ولكنه لا يتكلم عن حفظ هذه الكمية. بل العكس تمامًا، حيث إنّها كمية غير محفوظة وخصوصًا خلال العمليات الطبيعية وهي تزداد دائمًا مع الزمن.

8-15 من النظام إلى الفوضى

قد يبدو القصور الحراري كما عرض ونوقش إلى الآن وكأنّه مفهومٌ تجريدي. ولكي يصبح مبدأ القصور الحراري أقرب إلى الواقع، سنحاول ربطه بمفهومي الترتيب والفوضى الاعتياديين. ويمكن في الحقيقة اعتبار القصور الحراري لنظام ما على أنه مقياس الفوضى (أو عدم الترتيب) في النظام. وبناءً على ذلك يمكن إعادة صياغة القانون الثاني في الديناميكا الحرارية ليصبح:

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة عامة)

تميل العمليات الطبيعية نحو حالة فوضى أكبر

وما نقصد بعدم الترتيب تحديداً قد لا يكون دائماً واضحاً، ولذلك سنقدم عدة أمثلة. ونأمل أن توضِّحَ بعض هذه الأمثلة كيفية تطبيق القانون الثاني في الديناميكا الحرارية على الحالات التي تُعدُّ ما بعد الديناميكا الحرارية.

وسنعيد النظر الآن في العمليات المبسطة المذكورة في (البند 14 – 4). حيث يكون الوعاء المحتوي على طبقات منفصلة من الملح والبهار أكثر ترتيباً من الوعاء الذي يحتوي على الملح والبهار المخلوطين معاً. وأنّ هزّ الوعاء المحتوي على الطبقتين المنفصلتين من الملح والبهار سيعمل على خلطهما ببعض، ولا يمكن لأيّ مقدار اهتزاز لاحق أن يفصل الطبقتين بعد ذلك عن بعضهما بعضا. وبذلك تكون العملية الطبيعية هي الانتقال من الحالة ذات الترتيب النسبي (الطبقات) إلى الحالة ذات عدم الترتيب النسبي (الخليط) وليس العكس. أي أن عدم الترتيب سيزداد. والمثال الثاني يتناول كوب قهوة صلب، غير مكسور، وهو بذلك يكون أكثر "ترتيباً" من قطعه المتناثرة بعد كسره. وتكسر الأكواب عند سقوطها، ولا يمكن لها أن تعود إلى وضعها الأصلي بعد كسرها من تلقاء نفسها (كما عرض تجاوزاً في المثال 15 – 10). ويعدّ التطور الطبيعي للأحداث هو اتجاهها نحو ازدياد عدم الترتيب. وعند ملامسة جسم ساخن لجسم آخرٍ بارد، فإن الحرارة ستنساب من الجسم ذي درجة الحرارة المرتفعة إلى الجسم ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى أن يصل الجسمان إلى درجة حرارة متوسطة بينهما. ويمكن لنا أن نميز في بداية العملية صنفين من الجزيئات هما: جزيئات ذات متوسط طاقة حركية مرتفعة (الجسم الساخن)، وجزيئات أخرى ذات متوسط طاقة حركية منخفضة (الجسم الأبرد). وبعد عملية انسياب الحرارة تُصبِحُ الجزيئات جميعها تابعة لصنف واحد وستمتلك عندها متوسط طاقة حركية واحدة، ولن يكون لدينا الترتيب السابق للجزيئات في صنفين. ويكون الترتيب قد اتجه نحو عدم الترتيب. وإضافة إلى ذلك، فإنه من الممكن تصنيف الجسمين المنفصلين الساخن والبارد على أنهما المنطقتان ذواتا درجتي الحرارة المرتفعة والمنخفضة للآلة الحرارية، ويمكن أن يستخدما للحصول على شغل مفيد. ولكن بعد تلامس الجسمين مع بعضهما ووصولهما إلى درجة الحرارة نفسها يصبح عندها من غير الممكن الحصول على شغل مفيد منهما. وبذلك يكون عدم الترتيب قد ازداد؛ لأن النظام القادر على بذل الشغل يكون أكثر ترتيباً من النظام غير القادر على بذل الشغل.

وعندما يسقطُ حجرٌ باتجاه سطح الأرض، فإنّ طاقته الحركية ستتحول إلى طاقةٍ حراريّةٍ عند اصطدامه . (وقد لاحظنا سابقاً أنّ العكس لا يحدث أبدا؛ أي أنّ الحجر لن يمتص طاقة حرارية من محيطه، وهو سطح الأرض في هذه الحالة، ليرتفع بعد ذلك في الهواء بمفرده). وهذا مثال آخر على الانتقال من الترتيب إلى عدم الترتيب. وبالرغم من ارتباط الطاقة بالحركة العشوائية وغير المرتبة للجزيئات، إلاّ أنّ جزيئات الحجر الساقط جميعها تمتلك السرعة المتجهة نحو الأسفل نفسها بالإضافة إلى سرعتها العشوائية الذاتية . لذلك، فإنّ الطاقة الحركية الأكثر ترتيباً للحجر قد تحولت إلى طاقة حرارية غير مرتبة بعد اصطدامه بالأرض. ويزداد عدم الترتيب في هذه العملية كما يزداد في العمليات جميعها التي تحدث في الطبيعة.

9-15 عدم توافر الطاقة، والموت الحراري

لقد رأينا خلال عملية التوصيل الحراري من الجسم الساخن إلى الجسم البارد أن القصور الحراري قد ازداد، وأنَّ الترتيب قد اتجه إلى الفوضى، وأنّ الجسمين المنفصلين الساخن والبارد يمكن لهما أن يعملا كمنطقتي الحرارة المرتفعة والمنخفضة الضروريتين لعمل الآلة الحرارية اللتين يمكن استخدامها لعمل شغل مفيد. مع العلم بأنّه بعد أن تصبح درجة حرارة الجسمين متساوية نتيجة تلامسهما يصبح من غير الممكن الحصول على شغل منهما. وبالنظر إلى القدرة على بذل شغل مفيد، فإن الترتيب يكون قد توجّه إلى عدم الترتيب في هذه العملية.

ويمكن أن نعيد القول ذاته عند وصف صخرة تسقط باتجاه الأرض، وتسكن تماماً بعد اصطدامها بسطح الأرض. وكان من الممكن أن تستغل طاقة الصخرة الحركية في بذل شغل مفيد قبل اصطدامها بسطح الأرض. ولكن ما أن تتحول الطاقة الحركية الميكانيكية للصخرة إلى طاقة حرارية نتيجة الاصطدام فإنّ الصخرة تصبح غير قادرة على بذل شغل مفيد.
ويجسد المثالان السابقان ناحية أخرى مهمة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية:

في أي عملية طبيعية هناك جزء من الطاقة يصبح غير متاح لبذل شغل مفيد.

إنّ الطاقة محفوظة في أي عملية، ولا يفقد أي جزء منها أبداً. ونستطيع بدلاً من ذلك القول بأنّ الطاقة أصبحت أقلّ فائدة؛ بمعنى أنها أصبحت أقل قدرة على بذل شغل مفيد. وكلما تقدم الوقت تستهلك الطاقة أكثر من ذي قبل أي أنّها تُنقل من الأشكال الأكثر ترتيباً (مثل الميكانيكية منها) إلى الأشكال الأقل ترتيباً كالطاقة الداخلية أو الحرارية. ويقوم القصور الحراري بدور كبير هنا حيث يتناسب مقدار الطاقة غير القادر على بذل شغل مفيد طردياً مع التغير في القصور الحراري خلال أي عملية.

استهلاك الطاقة

والنتيجة الحتمية لاستهلاك الطاقة هو التوقع بتوجه الكون نحو عدم الترتيب مع مرور الوقت. وستصبح المادة خليطاً منتظماً، وسيستمر انسياب الحرارة من المناطق الساخنة إلى المناطق الباردة إلى أن تصبح درجة حرارة الكون ثابتة وأحادية. وعندها ستختفي القدرة على بذل أي شغل. وستتحول طاقة الكون جميعها إلى طاقة حرارية. وعندها، سيتوقف أي تغير. ويُدعى هذا التوقع أو التنبؤ بالموت الحراري للكون كما يسميه الفلاسفة الذين تداولوا الموضوع باستفاضة. واستنادا إلى القانون الثاني في الديناميكا الحرارية، فإن هذه النهاية أمر لابُدَّ منه، وإنْ كان حدوثه بعيداً جدّاً في المستقبل.

"الموت الحراري"

* 10-15 التطور والنمو، "سهم الزمن"

تطبيق الفيزياء
التطور الحيوي

من الأمثلة المثيرة للاهتمام ذلك الذي يربط الزيادة في القصور الحراري بالتطور الحيوي ونمو الكائنات الحية. ومن الواضح أن الإنسان كائن حي عالي الترتيب. وتصف نظرية التطوّر عملية ازدياد الترتيب ابتداء من أشكال الحياة البسيطة في بداياتها المجهرية وصولاً إلى الانسان. ويعدّ التطور من خلية واحدة إلى إنسان كامل النمو عملية زيادة في الترتيب. فهل تخالف هذه العمليات القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟ والإجابة على ذلك هو "لا". ففي عمليات التطور والنمو وحتى خلال حياة الإنسان الناضج يتمّ التخلّص من الفضلات الناتجة. وهذه الجزيئات الصغيرة المتبقية من عملية الأيض هي جزيئات بسيطة بلا أي ترتيب. وهي بذلك تمثل زيادة في الفوضى أو قصورا حراريا أعلى نسبياً. وفي الحقيقة، فإن القصور الحراري الكلي للجزيئات الناتج من العمليات الحيوية خلال عمليات التطور والنمو هو أكبر من النقصان في القصور الحراري المرتبط بالترتيب الناتج من نمو الشخص أو تطور الأنواع.

ومن جهة أخرى، فإن القانون الثاني في الديناميكا الحرارية يخبرنا عن اتجاه تقدم العمليات. فإذا صادف أن شاهدت أحداث فيلم مصور تعرض أحداثه من النهاية إلى البداية، لعرفت ذلك بلا أدنى شك. وقد تبدو الأحداث غريبة نوعاً ما، فعلى سبيل المثال، فقد تشاهد تجمع الأجزاء المبعثرة لكوب مكسور وعودة الكوب إلى الرف، أو ترى بالوناً ممزقاً قد عاد إلى شكله المنتفخ المليء بالهواء. ونحن نعلم أنّ هذه العمليات لا تحدث في الطبيعة أبداً في هذا الاتجاه؛ إنّ هذا الاتجاه يعني ازدياد الترتيب ونقصان القصور الحراري. وهذا مخالف للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. وعندما نشاهد أحداث الفيلم معكوسة (أو عندما نتخيل أنّ الزمن يجري في الاتجاه المعاكس) نكون قد وصلنا إلى هذه القناعة بناءً على ملاحظتنا للقصور الحراري (والفوضى) سواء بازدياده أو نقصانه. وعليه، نستطيع أن نشير إلى القصور الحراري على أنّه "سهم الزمن أو السهم الزمني" لقدرته على إخبارنا عن اتجاه مرور الزمن.

* 11-15 التفسير الإحصائي للقصور الحراري والقانون الثاني

أصبحت الأفكار المرتبطة بالقصور الحراري وعدم الترتيب أكثر وضوحاً نتيجة استخدام التحليل الإحصائي أو الاحتمالي للحالة الجزيئية للنظام. وهذه الطريقة الإحصائية التي استخدمها لأول مرة العالم بولتزمان (1844 – 1906) قرب نهاية القرن التاسع عشر، تفرق وبوضوح تام بين "الحالة الجاهرية" و "الحالة دون المجهرية" للنظام. وتُحدَّد الحالة دون المجهرية للنظام عند تحديد موضع وسرعة كل جسيم (أو جزيء) تابع للنظام. في حين تُحدَّد الحالة الجاهرية للنظام عند إعطاء الصفات الجاهرية للنظام مثل: درجة حرارته، وضغطه، وعدد مولاته، وهكذا دواليك. وفي الحقيقة، فإننا لا نعرف إلا الحالة الجاهرية للنظام. هناك عددٌ كبيرٌ جدًّا من الجزيئات في النظام، ومن المستحيل تحديد موضعٍ وسرعةِ كل منها على حدة وفي اللحظة نفسها. ومع هذا، فمن الأهمية بمكان أن نعلم أنّ هناك عدداً كبيراً من الحالات دون المجهرية المرتبطة بالحالة الجاهرية نفسها.

ولنتناول مثالاً سهلاً وبسيطاً، ولنفترض أنك تمسك بأربع قطع نقدية في يدك، ثم قمت بإسقاطها على الطاولة أمامك. فعندما تحدد عدد الكتابات وعدد الصور الظاهرة بعد اسقاطك للقطع الأربع، فإنّك تحدّد الحالة الجاهرية للنظام المكون من القطع النقدية المعدنية الأربع. أما عندما تحدد كل قطعة نقدية على حدة ما إذا كانت تظهر الكتابة أم الصورة عليها وهي ملقاة على الطاولة، فإنّك تحدّد الحالة دون المجهرية للنظام. ويظهر الجدول التالي عدد الحالات دون المجهرية لكلّ حالة جاهريّة للنظام:

الحالة الجاهرية	الحالة دون المجهرية المحتملة (H صورة، T كتابة)	عدد الحالات دون المجهرية
4 صور	HHHH	1
3 صور، 1 كتابة	HHHT, HHTH, HTHH, THHH	4
2 صورتان، 2 كتابتان	HHTT, HTHT, THHT, HTTH, THTH, TTHH	6
1 صورة، 3 كتابات	TTTH, TTHT,THTT, HTTT	4
4 كتابات	TTTT	1

احتمالات

ويشير الافتراض الأساسي المستند إلى الطريقة الإحصائية إلى أنّ كل حالة دون مجهرية لها احتمالية الحدوث نفسها. وعليه، فإن عدد الحالات دون المجهرية والمرتبطة بالحالة الجاهرية نفسها لها علاقة مباشرة بالاحتمال النسبي لحدوث تلك الحالة الجاهرية. وتعدّ الحالةُ الجاهرية والمحتوية على صورتين وكتابتين الحالةَ الجاهرية ذات الاحتمال الأعظم حدوثاً عند إلقائنا القطع النقدية المعدنية الأربع علماً بأن هناك 16 احتمالاً (عدد الحالات دون المجهرية الكلية) والتي من ضمنها 6 حالات تحتوي كل منها على صورتين وكتابتين. لذلك، فإن احتمالية الحصول على صورتين وكتابتين هي 6 من ضمن 16 حالة ممكنة أو 38%. واحتمالية الحصول على صورة واحدة وثلاث كتابات هي 4 من ضمن 16 أو 25%. أمّا احتمالية الحصول على أربع صورٍ فهي 1 من 16 أو 6%. وعندما تُلقى القطع المعدنية 16 مرة، فليس من الضروري أن تحصل 6 مرات على صورتين وكتابتين أوليس من الضروري أن ترى 4 صور مرة واحدة فقط. هذه مجرد احتمالات حصول معدلات. ولكن عندما تقذف القطع المعدنية 1600 مرّةً، فإنّ الأرقام قد تقترب من تلك التي ذكرت في الأعلى مثل 38% وهي احتمالية الحصول على صورتين وكتابتين. وكلما زاد عدد المحاولات، اقترب الرقم أكثر وأكثر من النسب المعلنة.

وإذا ألقينا عدداً أكبر من القطع المعدنية، ولنقل 100 قطعة في آنٍ واحدٍ، فإن الحالة التي تظهر القطع جميعها صوراً (أو القطع جميعها كتابةً) يقل احتمال حدوثها بدرجة واضحة وكبيرة. هناك حالة دون مجهرية واحدة مكونة جميعها من كتابة. وهناك 99 حالة ممكنة تحتوي على صورة واحدة. ويعرض (الجدول 15 – 3) الاحتمالات الأخرى. وهناك حوالي 10^{30} حالة دون مجهرية ممكنة.* وعليه، فإن احتمال الحصول على 100 صورة هو احتمال ضئيل جداً يصل إلى 1 من 10^{30} ويكاد يكون معدوماً. واحتمالية الحصول على 50 صورة و 50 كتابة (انظر الجدول 3 – 15) هو $(1.0\times10^{29})/10^{30}=0.10$ = أو 10%. أما احتمال الحصول على 45 إلى 55 صورة فهو 90%.

ومن هنا، فإننا نرى أنه كلما ازداد عدد القطع النقدية، أصبح الحصول على أفضل ترتيب هو الاحتمال الأكثر صعوبة (100 صورة أو 100 كتابة). وأصبح أفضل احتمال هو الحصول على 50 صورة و50 كتابة أقل التوزيعات ترتيبًا. وتزداد احتمالية أن نقترب بمعدل 5% من أكثر احتمال ممكن كلّما ازداد عدد القطع النقدية.

*هناك احتمالان لكل قطعة نقدية : صورة أو كتابة . وعليه. فإن عدد الحالات دون المجهرية الممكنة هي $2\times2\times2\times\ldots=2^{100}=1.27\times10^{30}$ (باستخدام الآلة الحاسبة أو الطرق اللوغاريتمية).

جدول 15 – 3
مختلف احتمالات الحالات الجاهرية عندما ترمي 100 قطعة نقدية معدنية

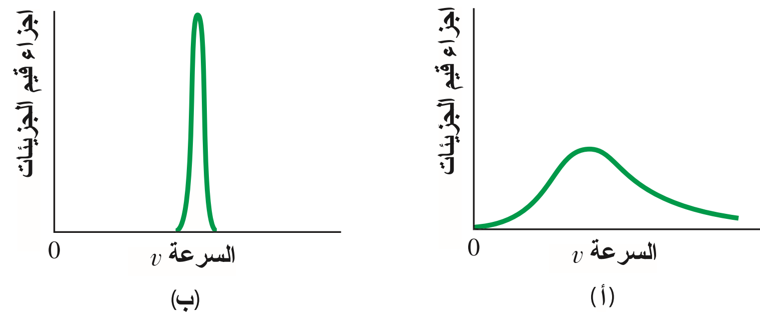
الحالات الجاهرية		عدد الحالات دون المجهرية	الاحتمالية
صورة	كتابة		
100	0	1	8.0×10^{-31}
99	1	1.0×10^{2}	8.0×10^{-29}
90	10	1.7×10^{13}	1.0×10^{-17}
80	20	5.4×10^{20}	4.0×10^{-10}
60	40	1.4×10^{28}	0.01
55	45	6.1×10^{28}	0.05
50	50	1.0×10^{29}	0.08
45	55	6.1×10^{28}	0.05
40	60	1.4×10^{28}	0.01
20	80	5.4×10^{20}	4.0×10^{-10}
10	90	1.7×10^{13}	1.0×10^{-17}
1	99	1.0×10^{2}	8.0×10^{-29}
0	100	1	8.0×10^{-31}

يمكن تطبيق هذه الأفكار على جزيئات النظام. وعلى سبيل المثال، فإنّ أكثر حالة يمكن حدوثها لغاز (كالهواء في الغرفة) هي تلك الحالة التي تصف انتشار جزيئات الغاز في فضاء الغرفة جميعه وهي تتحرّك عشوائياً، وترتبط هذه الحالة بتوزيع ماكسويل (الشكل 15 – 19 أ) (انظر الفصل 13). وفي الجانب الآخر، فإنّ أقلّ حالة يمكن حدوثها للغاز نفسه هي تلك التي تصف ترتيب الجزيئات جميعها في زاوية واحدة فقط من الغرفة وهي تتحرك بسرعة واحدة (الشكل 15 – 19 ب).

يتضح من هذه الأمثلة ارتباط الاحتمالات بعدم الترتيب وبالتالي بالقصور الحراري. أي أنّ الحالة ذات احتمالية الحدوث العظمى هي تلك المرتبطة بأعلى قصور حراري، أو بأقصى عدم ترتيب أو أعلى عشوائية.

القصور الحراري بدلالة الاحتمالية

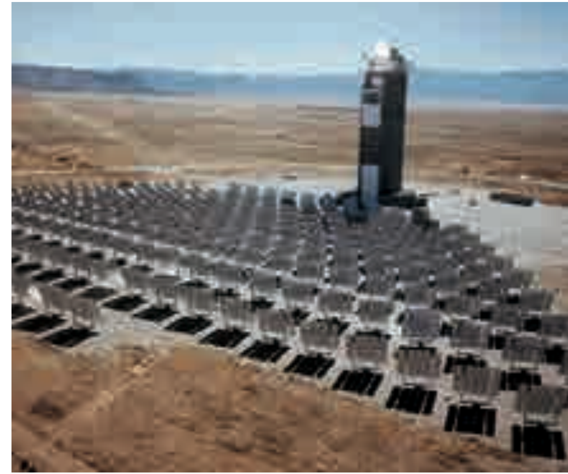
وبدلالة الاحتمالية، فإنّ القانون الثاني في الديناميكا الحرارية – والذي يخبرنا بازدياد القصور الحراري نتيجة لأي عملية – قد يتقلص إلى صيغة أن تلك العمليات تحدث لأنها الأعلى احتمالاً. وعليه، يصبح القانون الثاني صيغة اعتيادية (بديهية) ولكن مع إضافة صغيرة. إنّ القانون الثاني بدلالة الاحتمالات لا يمانع النقصان في القصور الحراري. ولكنّه يخبرنا أنّ احتمالية الحدوث ضئيلة جدًّا. أي أنّه ليس من المستحيل أن تنفصل طبقات الملح والفلفل عن بعضها بعضا تلقائياً، أو أن يعود الكوب المكسور لِيُصلِحَ نفسه بنفسه. بل حتى من الممكن أن تتجمد بحيرة في يوم صيف حار (نتيجة انسياب الحرارة من البحيرة الباردة إلى محيطها الخارجي الساخن). ومع هذا، فإن احتمالية حدوث هذه العمليات تكاد تكون معدومة. ولقد رأينا في مثال القطع النقدية أنّ زيادة عددها من 4 إلى 100 تقلّص بشكل واضح احتمالية الابتعاد عن المتوسط (أو الترتيب الأكثر احتمالية). وعادة (في الحياة العملية) نتعامل مع رقم هائل جدًّا من الجزيئات قد يصل إلى 6×10^{23} جزيء في المول الواحد. ويترتب على ذلك احتمالية ضئيلة جدًّا للانحراف عن متوسط القيم. وعلى سبيل المثال، فقد تم حساب احتمالية أن يقوم حجر يستقر راكدًا على سطح الأرض بعد تحويله 1 كيلو سعر من الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ليرتفع بعدها من موضعه في الهواء، وَوُجِدَ أنّ ذلك أقلّ احتمالاً من قيام مجموعة من القردة بإنتاج أعمال شكسبير جميعها بعد مجهود من الطباعة العشوائية.



الشكل 15 – 19 (أ) التوزيع الأكثر احتمالاً لسرعات جزيئات غاز ما (عشوائياً أو حسب ماكسويل). (ب) مرتب ومع هذا فهو ضئيل الاحتمال: توزيع السرعات وتكاد تمتلك الجزيئات جميعها السرعة ذاتها.

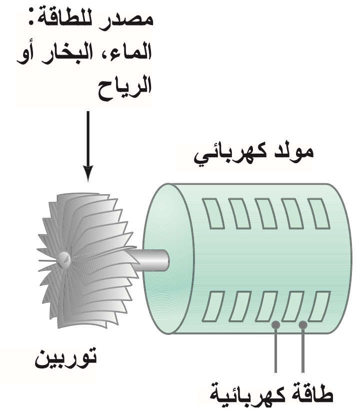

(جـ)


(ب)


(أ)

الشكل 20 – 15 (أ) تركز مجموعة من المرايا ضوء الشمس على سخان لإنتاج البخار قرب منشأة للطاقة الشمسية. (ب) محطة بخارية للوقود الأحفوري. (جـ) أبراج تبريد هائلة في محطة لتوليد الكهرباء.

الشكل 20 – 15 تحويل طاقة ميكانيكية أو حرارية إلى طاقة كهربائية بالاستعانة بمحرك ومولد.



تطبيق الفيزياء
الآلات الحرارية والتلوث الحراري

*12-15 التلوث الحراري والاحترار العالمي

إنّ معظم الطاقة التي نستهلكها في حياتنا اليومية، بدءاً من محركات السيارات إلى الكهرباء المولدة في محطات الطاقة، تستخدم الآلات الحرارية. وإذا أردنا عدم استخدام الآلات الحرارية في توليد الكهرباء (الشكل 15 – 20 أ) فنستطيع عندئذٍ توليدها عن طريق المياه الساقطة من السدود، أو باستخدام طواحين الهواء، أو الخلايا الضوئية. ومع هذا، فإن 90% من الكهرباء يتمّ توليدها في الولايات المتحدة الأمريكية في محطات بخارية للوقود الأحفوري (الفحم، أو النفط، أو الغاز)–(انظر الشكل 15 – 20) وهم بذلك يستخدمون الآلة الحراريّة (غالباً، الآلات البخارية). في محطّات توليد الطاقة الكهربائية، حيث يحرك البخار التوربينات والمولدات الكهربائية المنتجة للطاقة الكهربائية (الشكل 15 – 21). وقد تمّ مناقشة الوسائل المختلفة لتشغيل التوربينات باختصار في (الجدول 15 – 4) جنباً إلى جنب، مع ذكر بعض مزايا وعيوب كلّ منها. إضافة إلى أنّ محطات الطاقة النووية تستخدم الوقود النووي لتشغيل المحركات البخارية.

ويشار إلى الطاقة الحرارية Q_L الناتجة من الآلات الحرارية جميعها من محطات الطاقة إلى السيارات بالتلوث الحراري؛ لأنّ هذه الحرارة (Q_L) تمتصّ بالضرورة بواسطة المحيط الخارجي، ولنقل بواسطة المياه في المحيطات والبحيرات، أو بواسطة الهواء باستخدام أبراج تبريد هائلة (الشكل 15 – 20 جـ). وتعمل هذه الحرارة على رفع درجة حرارة مياه التبريد وتغيير البيئة الطبيعية للحياة البحرية (بسبب قلة نسبة الأكسجين في الماء الساخن). وفي حالة أبراج التبريد، فإنّ الحرارة الناتجة Q_L ترفع درجة حرارة الغلاف الجوي الذي يؤثر بدوره في المناخ.

نعني بتلوث الهواء انتشار الضباب الناجّ من العوالق الكيميائية في الهواء، الناجمة عن احتراق الوقود الأحفوري في السيارات ومحطات الطاقة وأفران المصانع. ويشكل تراكم ثاني أكسيد الكربون في غلاف الأرض الجوي واحدة من أكبر المشكلات المرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري. يمتص ثاني أكسيد الكربون بعض الأشعة تحت الحمراء التي تشعها الأرض (انظر الشكل 14 – 8) ما يتسبب في الاحتباس الحراري الكوني، وهي إحدى المشاكل التي يكمن حلها بالتقليل من عمليّة حرق الوقود الأحفوري. ومع هذا، فلا يمكن تجنّب التلوث الحراري. يستطيع المهندسون تصميم آلات أكثر كفاءة، ولكنهم لن يتخطوا كفاءة آلة كارنو. ويجب أن يتقبّلوا أنّ أفضل T_L يمكن الوصول إليها هي درجة حرارة الماء أو الهواء المعيارية. ويخبرنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بالحدود المفروضة من قبل الطبيعة. وما نستطيع عمله حسب القانون الثاني هو ترشيد استهلاكنا للوقود الأحفوري كي نحافظ على مصادره ووجوده لفترة أطول.

الجدول 4 – 15 مصادر الطاقة الكهربائية

أشكال إنتاج الطاقة الكهربائية	نسبة الإنتاج % (تقريباً) USA	العالم	الإيجابيات	السلبيات
المحطات البخارية للوقود الأحفوري : حرق الفحم والنفط والغاز الطبيعي لغلي المياه، وتوليد بخار ذي ضغط عال يعمل على إدارة محركات المولدات (الشكلان 15 – 12ب و 15 – 21). يتم استخدام الآلة الحرارية هنا.	87	86	نعرف كيف نبنيها وبأسعار غير مكلفة حالياً.	تلوث الهواء، والتلوث الحراري، والكفاءة المنخفضة واستنزاف للأرض عن طريق استخراج المواد الخام (التعدين)، والانحباس الحراري، والحوادث: مثل التسرب النفطي في المياه ومحدودية المخزون الطبيعي منها. (قدر ذلك خلال سنتين إلى عقدين إلى عدة قرون).
الطاقة النووية الانشطار: تنشطر أنوية اليورانيوم أو ذرات البلوتونيوم مع إصدار طاقة (الفصل 31) تعمل على تسخين البخار، ويتم استخدام الآلة الحرارية هنا.	8	6	لا يوجد عادة أي تلوث للهواء بتاتاً، ولا يساهم في الانحباس الحراري و هو رخيص نسبياً.	تلوث حراري، وأي حادث يمكنه أن يسرب إشعاعات ضارة، وصعوبة التخلص من النفايات النووية، ويمكن استغلالها من قبل الإرهاب ومحدودية مصادر الوقود.
الاندماج: تنطلق طاقة هائلة عند اندماج نظائر الهيدروجين (أو أي عناصر خفيفة أخرى). (الفصل 31)	0	0	نظيفة نسبياً، ومصادر هذه الطاقة متوافرة بغزارة (الهيدروجين من جزيئات الماء في المحيطات) ومساهمتها أقل في الانحباس الحراري.	لم تستخدم أو تستغل بعد.
الكهرباء من الماء اسقاط المياه يعمل على تحريك مولدات عند قاعدة سد.	4	7	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث مائي أو هوائي أو حراري، وغير مكلف نسبياً، وكفاءته مرتفعة ويمكن للسدود أن تمنع الفيضانات وتتحكم بها.	تغرق السدود الأراضي والأغادير، وتمنع هجرة الأحياء المائية وتكاثرها مثل سمك السلمون، وتساعد على جفاف الأراضي، وعددها قليل.
الحرارة الجوفية: البخار الطبيعي الناتج من باطن الأرض والقادم إلى السطح (الينابيع الحارة والجداول الحارة، ومنافذ البخار) أو تبخر المياه الباردة بعد ملامستها للصخور الجافة والساخنة.	<1	<1	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ومقدار ضئيل من التلوث الهوائي، وكفاءة مرتفعة ورخيصة نسبياً ونظيفة.	عدد قليل من الأماكن المناسبة، وانتاجية ضئيلة جداً، واحتمالية تلوث ناشئة عن وجود فلزات ذائبة في المياه الساخنة.
طاقة الرياح: طواحين هواء مصنفة 3 كيلو واط– 5 ميغا واط (ذات شفرات يصل طولها إلى 50 م) تحرك مولدات.	<1	<1	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو مائي أو حراري، ورخيصة نسبياً.	هناك حاجة إلى عدد كبير من طواحين الهواء التي قد تؤثر في الجو وتؤذي الأعين، وخطرة على الطيور المهاجرة، ولا يوجد ضمان على سرعة الرياح أو قوتها.
الطاقة الشمسية **تدفئة شمسية نشطة:** تمتص الخلايا الشمسية المبنية على السطوح أشعة الشمس التي تسخن الماء في أنابيب لتعمل على تزويد المباني بالماء الساخن والطاقة الحرارية.	<0.1	<1	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو حراري ومصدر للطاقة غير محدود.	محدودية المكان، وتحتاج إلى وسائل مساندة وغالية نسبياً، وتقل كفاءتها مع ازدياد الغيوم.
تدفئة شمسية خاملة: أجهزة وطرق معمارية مثل توجيه النوافذ إلى الجنوب لمنع أشعة الشمس من دخول المباني خلال فترة الصيف.			لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو حراري، ورخيصة نسبياً.	منعدمة تقريباً ، ولكن هناك حاجة إلى طرق مساندة أخرى.
الخلايا الضوئية (الخلايا الضوئية الجهودية): تعمل على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء دون الحاجة إلى استخدام آلة حرارية.			لا ضرورة لاستخدام أي آلة حرارية، ونسبة التلوث الحراري والمائي والهوائي ضئيلة جداً، وكفاءة عالية ($<$ 30%) وبتحسن مستمر)	غالية، وتسبب تلوثا كيميائيا، وبحاجة إلى مساحة كبيرة لأن أشعة الشمس غير مركزة.

طريقة حلّ المسائل: الديناميكا الحرارية

1. عرّف **النظام** الذي تتعامل معه، وميز النظام من محيطه الخارجي.

2. انتبه عند استخدام **الإشارات** المرتبطة **بالشغل والحرارة** في القانون الأول للديناميكا الحرارية؛ لأنّ الشغل الذي يبذله النظام هو شغل موجب، أمّا الشغل الذي يبذل على النظام فهو شغل سالب. والحرارة المضافة إلى النظام تكون موجبة، في حين تكون الحرارة المفقودة من النظام سالبة. أما في الآلات الحرارية، فإن كلا من الحرارة المدخلة، والحرارة الناتجة، والشغل المبذول فهي موجبة دائماً.

3. انتبه للوحدات المستخدمة في الشغل والحرارة حيث **وحدة** الشغل هي الجول، ولكن وحدة الحرارة هي السعر أو الكيلو سعر أو الجول. ويجب عدم الخلط بين الوحدات فإذا بدأت بحلّ سؤال ما باستخدام وحدة، فعليك إنهاء السؤال مستخدما الوحدة نفسها.

4. يجب أن تستخدم **درجات الحرارة** بالكلفن، أما الفرق في درجات الحرارة فيمكن أن يعبر عنه إما بـ C° أو الكلفن.

5. **الكفاءة (أو معامل الأداء)** هي النسبة بين انتقالين للطاقة: ناتج مفيد مقسوم على مدخل ضروري. وتُعطى الكفاءة دائماً بدلالة نسبة مئوية لأنها دائماً أقل من 1 (ولا ينطبق هذا على معامل الأداء).

6. يزداد **القصور الحراري** لنظام ما عندما تضاف حرارة إليه ويقل عند إزالة حرارة منه. وإذا انتقلت الحرارة من النظام A إلى النظام B، فإن التغير في القصور الحراري لـ A سالب أمّا التغير في القصور الحراري لـ B فموجب.

ملخص

ينصُّ القانون الأول في الديناميكا الحرارية على أن التغير في الطاقة الداخلية ΔU للنظام يساوي الحرارة المضافة إلى النظام Q ناقص الشغل المبذول بواسطة النظام W:

$$\Delta U = Q - W \quad (15-1)$$

وهذا هو نصّ حفظ الطاقة. ووجد أنه يبقى صحيحاً لأنواع العمليات جميعها. إنّ العملية أحادية الحرارة هي العملية التي تحدث عند درجة حرارة ثابتة.

ولا يتم تبادل الحرارة خلال العملية الكظمية ($Q = 0$). ويعطى الشغل المبذول بواسطة الغاز عند ضغط ثابت كالتالي:

$$W = P\,\Delta V \quad (15-3)$$

حيث ΔV هو التغير في حجم الغاز.

وتُعدّ الآلة الحرارية جهازاً لتحويل الطاقة الحرارية إلى شغل مفيد ناتج من انسياب الحرارة بين درجتي حرارة مختلفتين.

وتعرف كفاءة الآلة الحرارية e على أنها نسبة الشغل المبذول بواسطة الآلة إلى الحرارة المدخلة Q_H. ونتيجة لحفظ الطاقة، فإن الشغل الناتج يساوي $Q_H - Q_L$، حيث تمثل Q_L الحرارة المنسابة عند درجة الحرارة المنخفضة إلى المحيط الخارجي:

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \quad (15-4)$$

ويمكن كتابة الحد الأعلى للكفاءة (كفاءة كارنو) بدلالة درجتي الحرارة العظمى T_H والدنيا T_L (بالكلفن) للآلة كالتالي:

$$e_{ideal} = 1 - \frac{T_L}{T_H}. \quad (15-5)$$

وتعمل **الثلاجات ومكيفات الهواء** بعكس عمل الآلة الحرارية: يبذل الشغل لإزالة الحرارة من المنطقة الباردة والتخلص منها في المنطقة ذات درجة الحرارة المرتفعة. ومعامل الأداء لكل منهما (COP) هو:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} \quad \text{[للثلاجة أو لمكيف الهواء]} \quad (15-6\text{ أ})$$

حيث تمثل W الشغل الضروري لإزالة الحرارة Q_L من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة.

تبذل المضخة الحرارية شغلاً W لنقل الحرارة Q_L من الخارج البارد وتزويد الحرارة Q_H إلى الداخل الدافئ. ومعامل أداء المضخة الحرارية هو:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W} \quad \text{[المضخة الحرارية]} \quad (15-7)$$

ويمكن صياغة القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بعدة طرق متكافئة :

(أ) تتناسب الحرارة تلقائياً من الجسم الساخن إلى الجسم البارد والعكس غير صحيح.

(ب) لا وجود لأي آلة حرارة ذات كفاءة 100% قادرة على تحويل أيّ مقدار من الحرارة كليًّا إلى شغل.

(جـ) تميل العمليات الطبيعية إلى التحرك باتجاه ازدياد القصور الحراري أو ازدياد عدم الترتيب.

وتُعدّ (جـ) الصياغةَ العامة الأكثر انتشاراً للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. ويمكن عرضها بطريقة أخرى كالتالي: يزداد القصور الحراري S لأي نظام بالإضافة إلى القصور الحراري لمحيط النظام نتيجة لأيّ عملية طبيعية :

$$\Delta S > 0 \quad (15-9)$$

ويُعطى التغير في القصور الحراري في عملية ما يتمّ خلالها نقل للحرارة Q عند درجة حرارة ثابتة T كالتالي:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (15-8)$$

ويمثّل القصور الحراري مقياس مقدار عدم ترتيب النظام. وكلما انقضى الوقت، استهلكت الطاقة وتحولت إلى شكل غير مفيد؛ أيْ أنّها أصبحت غير متاحة لبذل شغل مفيد.

[* ويخبرنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية عن اتجاه سير العمليات ويفسر تسمية القصور الحراري"بالسهم الزمني].

[* تساهم الآلات الحرارية جميعها بالتلوث الحراري بسبب الحرارة التي تخرجها نحو المحيط الخارجي].

أسئلة

1. ماذا يحدث للطاقة الداخلية لبخار الماء في الهواء عندما يتكاثف على الجدار الخارجي لكوب زجاجي مليء بالماء البارد؟ هل سيتمّ بذل شغل أم تبادل للحرارة؟ وضح إجابتك.

2. استخدم حفظ الطاقة لتفسير ازدياد درجة حرارة الغاز عند تقلصه المفاجيء ونقصانها عند تمدده.

3. بذل غاز مثالي شغلاً مقداره 3700 J خلال عملية أحادية درجة الحرارة. هل هذه المعلومة كافية للدلالة على مقدار الحرارة المضافة إلى النظام؟ وإذا كانت كذلك فما مقدارها؟

4. هل من الممكن أن تبقى درجة حرارة النظام ثابتة بالرغم من انسياب الحرارة منه أو إليه؟ وإذا كان الحل نعم، أعط مثالا أو مثالين على ذلك.

5. وضح لماذا تزداد درجة حرارة النظام عندما يتقلص خلال عملية كظمية.

6. هل يمكن للطاقة الميكانيكية أن تتحول كلياً إلى حرارة أو طاقة داخلية؟ وهل يمكن حدوث العكس؟ وإذا كانت إجابتك في كل حالة لا، فسّر ذلك، أما إذا كانت إجابتك نعم، فاعط مثالًا أو مثالين.

7. هل تستطيع تدفئة المطبخ في الشتاء عن طريق إبقاء باب الفرن مفتوحاً؟ وهل تستطيع تبريد المطبخ في يوم صيف حار بترك باب الثلاجة مفتوحاً؟

8. وضح إجابتك. $e = W/Q_L$ هل يعدّ تعريف كفاءة آلة حرارية كالتالي مفيداً؟ وضح إجابتك.

9. كيف تفرق بين منطقتي درجة الحرارة العالية ودرجة الحرارة المنخفضة في: (أ) آلة الاحتراق الداخلي؟ (ب) الآلة البخارية؟

10. ما الذي سيؤثر في كفاءة آلة كارنو ويحسنها بشكل ملموس أكثر: زيادة درجة حرارة خزان ساخن بمقدار $10\ C°$، أم نقصان درجة حرارة خزان بارد بمقدار $10\ C°$؟ وضح إجابتك.

11. تحتوي المحيطات على كميات هائلة جداً من الطاقة (الداخلية) الحرارية. لماذا لا يمكن الاستفادة من هذه الطاقة على شكل شغلٍ مفيد؟

12. سُمِحَ لغازٍ أن يتمدد: (أ) كظمياً (ب) عند درجة حرارة ثابتة. فهل سيزداد القصور الحراري خلال كل عملية، أم سينقص، أم سيبقى ثابتاً؟ وضح إجابتك.

13. يمكن لغاز ما أن يتمدد لضعفي حجمه الأصلي إما كظميًّا أو تحت درجة حرارة ثابتة. ما العملية التي ينتج منها أكبر تغير في القصور؟ وضح إجابتك.

14. أعط ثلاثة أمثلة غير تلك التي ذكرت في هذا الفصل لعمليات تحدث في الطبيعة وتتجه من الترتيب إلى الفوضى. تكلم عن احتمالية حدوث العكس.

15. أي من التالي له قصور حراري أكبر: 1 kg من الحديد الصلب أم 1 kg من الحديد السائل؟ لماذا؟

16. (أ) ما الذي سيحدث عند رفع غطاء قارورة تحتوي على غاز الكلور؟ (ب) هل يمكن للعملية العكسية أن تحدث؟ إن كان الحل نعم فلماذا تحدث، وإن كان لا فلماذا لا تحدث؟ (ج) هل يمكن لك أن تفكر في مثالين آخرين لا يمكن أن يحدثا في الاتجاه المعاكس؟

17. طُلب إليك أن تختبر آلة تسمى "مكيف هواء داخلي": الآلة صندوق يوضع في منتصف الغرفة، يمتد منه سلك كهربائي. وعندما يتم تشغيلها، تشعر بتيار الهواء البارد الصادر منها. الهواء البارد يخرج منها. كيف يمكنك معرفة ما إذا كانت هذه الآلة قادرة على تبريد الغرفة؟

18. فكر في عدة عمليات قد تُحقّق القانون الأول للديناميكا الحرارية (باستثناء العمليات التي ذُكرت) وفي حالة وجود مثل هذه العمليات فإنها لن تحقق القانون الثاني.

19. افترض أن عدداً كبيراً من الأوراق بعثرت على أرض الغرفة فقمت بجمعها وترتيبها. فهل هذا يخالف القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟ وضح إجابتك.

20. يمكن التعبير عن القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية بطريقة مختلفة وعلى الترتيب كالتالي: "لا يمكن الحصول على شيء من العدم" و"لا يمكنك تحقيق حتى التعادل". وضح كيف يمكن لهاتين العبارتين أن تكافئا نصي القانونين الأصليين.

21*. غالباً ما يدعى القصور الحراري "بالسهم الزمني" لأنه يخبرنا باتجاه حدوث العمليات الطبيعية. اذكر بعض العمليات التي ستخبرك بأن الزمن يتحرك في الاتجاه المعاكس خلال مشاهدتك لفيلم سينمائي يُعرض عكسياً.

22*. تحوّل الكائنات الحيّة خلال نموها جزيئات الغذاء البسيطة نسبياً إلى تركيب معقد. هل هذا مخالف لقانون الديناميكا الحرارية؟

مسائل

15 – 1 و15 – 2 القانون الأول في الديناميكا الحرارية

1. يبذل غاز مثالي خلال تمدده في علمية أحادية الحرارة شغلاً مقداره 3.40×10^3 J. احسب: (أ) التغير في الطاقة الداخلية للغاز. (ب) مقدار الحرارة الممتصة خلال هذا التمدد.

2. (I) يخضع غاز في أسطوانة ذات مكبس عديم الاحتكاك لضغط جوي معياري. ولوحظ أن حجم الغاز يزداد ببطء من $12.0\ m^3$ إلى $18.2\ m^3$ عند إضافة 1400 kcal. احسب: (أ) الشغل المبذول بواسطة الغاز. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز.

3. (I) تم تبريد لتر واحد من الغاز تحت ضغط ثابت إلى أن تقلص حجمه إلى النصف ثم سُمِحَ له بتمددٍ أحادي الحرارة إلى أن عاد إلى حجمه الأولي. ارسم العملية على مخطط PV.

4. (I) ارسم مخطط PV لكل من العمليات التالية: تم تبريد 2.0 L من الغاز المثالي عند الضغط الجوي المعياري إلى أن أصبح حجمه 1.0 L، ثمّ سُمِحَ له بالتمدُّد تحت درجة حرارةٍ ثابتة ليعود إلى حجمه الأصلي 2.0 L، ومن ثم سمح للضغط بالازدياد مع ثبات حجمه ليعود الضغط الجوى إلى ما كان عليه في البداية (أي ضغط جوي معياري).

5. (II) سُمِحَ لكمية من الهواء حجمها 1.0 L عند ضغط 4.5 atm مطلق بالتمدد أحادي الحرارة إلى أن أصبح ضغطها 1.0 atm. ثم قلّصت إلى حجمها الأصلي تحت ضغط ثابت، ثم أُعيدت أخيراً إلى ضغطها الأولي بتسخينها مع إبقاء حجمها ثابتاً. ارسم هذه العملية على مخطط PV متضمناً الأعداد واسمي المحورين.

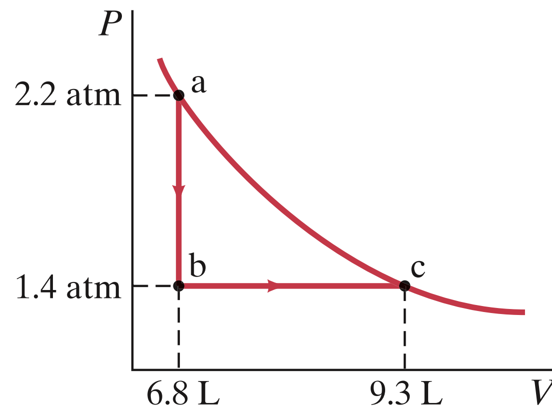
6. (II) تم تخفيض ضغط غاز مثالي إلى النصف مع إبقائه في وعاءٍ ذي جدران صلبة. وفقد الغاز خلال هذه العملية 265 KJ من حرارته. (أ) ما مقدار الشغل المبذول خلال هذه العملية؟ (ب) ما التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال هذه العملية؟

7. (II) تمّ تقليص حجم غاز يكاد يكون مثالياً إلى النصف خلال عملية كظمية داخل آلة. وتمّ بذل شغل قدره 1850 J على الغاز خلال ذلك. (أ) ما مقدار الحرارة المنسابة إلى داخل الغاز أو خارجه؟ (ب) ما التغير في الطاقة الداخلية للغاز؟ (جـ) هل تزداد درجة حرارة الغاز أم تقل؟

.8 (II) يتمدد غاز عند ضغط كُلّي ثابت مقداره 3.0 atm من 400 mL إلى 660 mL. ثم تنساب الحرارة منه إلى الخارج مع ثبات حجمه، ويسمح للضغط ودرجة الحرارة بعد ذلك بالنقصان إلى أن تصل درجة حرارته إلى ما كانت عليه في البداية. احسب: (أ) الشغل الكلي الذي يبذله الغاز خلال هذه العملية. (ب) الحرارة الكلية المنسابة إلى داخل الغاز.

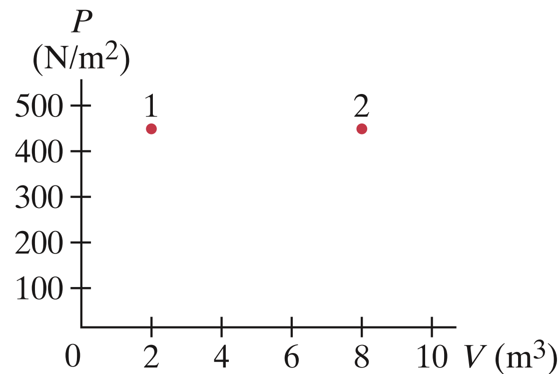
.9 (II) يتمدد مول ونصف المول من غاز مثالي أحادي الذرة كظمياً فيبذل شغلاً مقداره 7500 J خلال العملية. ما التغير في درجة حرارة الغاز خلال التمدد؟

.10 (II) خذ بالحسبان العملية التالية ثنائية الخطوة. تنساب الحرارة نحو الخارج من غاز مثالي مع ثبات حجمه، فيهبط ضغطه من 2.2 atm إلى 1.4 atm، ثمّ يتمدّد الغاز عند ضغط ثابت من حجم 6.8 L إلى 9.3 L لتصل حرارته إلى قيمتها الأولى. انظر (الشكل 15 – 22). احسب: (أ) الشغل الكلي الذي يبذله الغاز خلال هذه العملية. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال هذه العملية. (جـ) الحرارة الكلية المنسابة إلى داخل الغاز أو الخارجة منه.



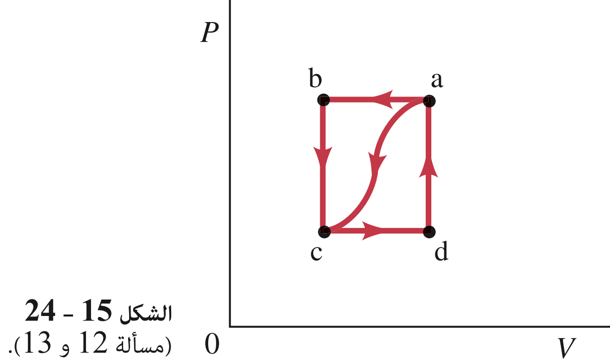
الشكل **15 - 22** (مسألة 10).

.11 (II) يظهر المخطط PV في (الشكل 15 – 23) حالتين محتملتين لنظام يحتوي على 1.35 مول من غاز مثالي أحادي الذرة. ($V_2 = 8.00\ m^3$ و $V_1 = 2.00\ m^3$ و $P_1 = P_2 = 455\ N/m^2$). (أ) ارسم العملية التي تعكس تمدد أحادي الضغط من الحالة 1 إلى الحالة 2 وأطلق على هذه العملية A. (ب) أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز والتغير في طاقة الغاز الداخلية خلال هذه العملية. (جـ) ارسم العملية ذات الخطوتين التي تعكس تمدد أحادي الحرارة من الحالة 1 إلى الحجم V_2 ، ثم يتبعها ازدياد في درجة الحرارة أحادي الحجم إلى الحالة 2، وأطلق على هذه العملية B. (د) أوجد التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال العملية B ذات الخطوتين .



الشكل **15 - 23** (مسألة 11).

.12 (III) عند أخذ الغاز من a إلى c خلال المسار المنحني في (الشكل 15 – 24)، كان الشغل المبذول بواسطة الغاز $W = -35$ J، والحرارة المضافة للغاز هي $Q = -63$ J وكان الشغل المبذول خلال المسار abc هو $W = -48$ J. (أ) ما هو Q للمسار abc؟ (ب) إذا كان $P_c = \frac{1}{2}P_b$، فما هو W للمسار eda. (جـ) ما هو Q للمسار cda؟ (د) ما هي $U_a - U_c$؟ (e) إذا كان $U_d - U_c = 5$ J، فما هو Q للمسار da؟



الشكل **15 - 24** (مسألة 12 و 13).

.13 (III) خلال عملية أخذ الغاز من الحالة a إلى الحالة c على امتداد المسار المائل المبين في (الشكل 15 – 24)، فإن 80 جولاً من الحرارة سيغادر النظام، وسيتم بذل 55 J من الشغل على النظام. (أ) حدد التغير في الطاقة الداخلية $U_a - U_c$. (ب) عند أخذ الغاز خلال المسار cda، بذل الغاز شغلاً $W = 38$ J، فما مقدار الحرارة Q المضافة إلى الغاز خلال العملية cda؟ (جـ) إذا كان $P_a = 2.5\ P_d$، فما مقدار الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال العملية abc؟ (د) ما هو Q خلال المسار abc؟ (هـ) إذا كان $U_a - U_b = 10$ J. فما هو Q للعملية bc؟

وهذا ملخص للمعطيات:

$$Q_{a\to c} = -80\ J$$
$$W_{a\to c} = -55\ J$$
$$W_{cda} = 38\ J$$
$$U_a - U_b = 10\ J$$
$$P_a = 2.5 P_d.$$

*15 – 3 أيض الإنسان

.14* (I) ما مقدار الطاقة التي ستتحول لو أنّ الشخص في (المثال 15 – 8) أخذ راحة خلال فترة الظهيرة ثمّ ركض ساعة كاملة بدلاً من العمل مدة 11.0 ساعة يوميًّا؟

.15* (I) احسب معدل أيض يومي لشخص ما ينام مدة 8.0 ساعات، ويجلس على مكتبه 8.0 ساعات، ويقوم بأعمال خفيفة 4.0 ساعات، ويراقب التلفاز مدة ساعتين، ثم يلعب كرة مضرب مدة 1.5 ساعة، وأخيراً يركض مدة نصف ساعة.

.16* (II) قرّر شخص ما أن يفقد وزناً عن طريق انقاص ساعات نومه بمعدل ساعة واحدة يومياً يستغلها في إنجاز بعض الأعمال بمجهود خفيف. ما الوزن (أو الكتلة) الذي من المتوقع أن يخسره هذا الشخص لو أنه لم يغير نظام غذائه؟ افرض أن 1 kg من الدهن يختزن نحو 40.000 kJ من الطاقة.

15 – 5 الآلات الحرارية

.17 (I) تخرج الآلة الحرارية 8200 J من الحرارة خلال بذلها شغلاً نافعاً بمقدار 3200 J. فما كفاءة هذه الآلة؟

.18 (I) تبذل آلة حرارية شغلاً مقداره 9200 J خلال الدورة الواحدة، في حين تمتص 22.0 Kcal من الحرارة من خزان ذي درجة حرارة مرتفعة. فما كفاءة هذه الآلة؟

.19 (I) ما الكفاءة العظمى لآلة حرارية تعمل بين درجتي الحرارة 580°C و 380°C؟

20. (I) درجة الحرارة الصادرة عن آلة حرارية هي $230°C$. فما الحرارة المرتفعة الضرورية لجعل كفاءة كارنو 28%؟

21. (I) تعمل محطة طاقة نووية بمعدل 75% من كفاءتها العظمى النظرية (كارنو) بين درجتي الحرارة $625°C$ و $350°C$. فإذا كانت هذه المحطة تنتج طاقة كهربائية بمعدّل 1.3 GW، فما مقدار الحرارة التي تطردها إلى الخارج خلال كل ساعة؟

22. (II) ليس من الضروري لدرجة الحرارة المرتفعة لمحيط الآلة الحراريّة أن تكون أعلى من درجة الحرارة المعيارية. وبما أنّ تكلفة النيتروجين السائل (عند 77 K) هي نفسها لزجاجة ماء شرب، فاحسب كفاءة الآلة التي ستعمل على تحويل الحرارة من درجة حرارة الغرفة (293 K) إلى درجة حرارة "وقود" النيتروجين السائل (الشكل 25 – 15).



الشكل **25 - 15** (مسألة 22).

23. (II) تبذل آلة كارنو شغلاً بمعدل 440 kW، في حين تستهلك 680 kcal من الحرارة خلال الثانية. فإذا كانت درجة حرارة مصدر الحرارة $570°C$، فما درجة حرارة الحرارة المبددة إلى الخارج؟

24. (II) إذا كانت درجتا الحرارة الضروريتان لعمل آلة كارنو هما $210°C$ و $45°C$، وكانت قدرة الآلة الناتجة 950 W. فاحسب معدل الحرارة الناتجة.

25. (II) تُنتج محطة طاقة ما 550 MW من القدرة الكهربائية. قدّر كمية الحرارة المبددة خلال كلّ ثانية مفترضًا أنّ كفاءة المحطة هي 38%.

26. (II) تستغل آلة حرارية لها كفاءة مثالية (كارنو) تعادل 28% مصدرا للحرارة درجة حرارته $550°C$. فما درجة حرارة المصدر الضرورية لرفع كفاءة الآلة إلى 35%؟

27. (II) إنّ كفاءة كارنو لآلة حرارية هي 39% عندما تبدّد الحرارة عند $350°C$. ما درجة الحرارة المبددة الضرورية لرفع كفاءة كارنو إلى 49%؟

28. (II) تعمل الآلات البخارية في محطة تعمل على القدرة البخارية كأزواج بحيث تكون الحرارة الناتجة من إحدى الآلتين هي الحرارة المدخلة إلى الآلة الثانية. ودرجات الحرارة التي تعمل عليها هذه الأزواج هي $670°C$ و $440°C$ للآلة الأولى، و $430°C$ و $290°C$ للآلة الثانية. فإذا كانت حرارة احتراق الفحم 2.8×10^7 J/kg، فما معدل احتراق الفحم الضروري لإنتاج 1100 MW من القدرة؟ افرض أنّ كفاءة الآلات هي 60% من الكفاءة المثالية لكارنو.

15 – 6 الثلاجات والمكيفات والمضخات الحرارية

29. (I) درجة الحرارة المنخفضة لملف التبريد في البراد هي $-15°C$، ودرجة الحرارة المبددة هي $30°C$. ما المعامل النظري الأعظم للأداء؟

30. (II) تعمل ثلاجة-براد مثالية ذات COP = 7.0 في غرفة درجة حرارتها $24°C$. ما درجة الحرارة داخل البرّاد؟

31. (II) يعادل معامل أداء ثلاجة في مطعم 5.0. فإذا كانت درجة الحرارة في المطبخ خارج الثلاجة $29°C$، فما أقلّ درجة حرارة يمكن الوصول إليها داخل الثلاجة على اعتبار أنها مثالية؟

32. (II) تستخدم مضخة حرارية لإبقاء منزل ما دافئاً عند $22°C$. ما مقدار الشغل الضروري الذي يجب أن تبذله المضخة لتزويد المنزل بمقدار 2800 J من الحرارة إذا كانت درجة الحرارة خارج المنزل هي: (أ) $0°C$؟ (ب) $-15°C$؟ افرض أداءاً مثالياً (كارنو) للمضخة.

33. (II) ما حجم الماء عند درجة حرارة $0°C$ الذي سيتحول إلى مكعبات ثلج خلال ساعة واحدة داخل براد إذا كان معامل أداء وحدة تبريده يعادل 7.0 وقدرته المدخلة 1.0 kw؟

34. (II) ما معامل أداء آلة (كارنو) مثالية كفاءتها 35% عند عكس طريقة عملها، وجعلها مضخة حرارية؟

15 – 7 القصور الحراري

35. (I) ما التغير في القصور الحراري لـ 250 g من البخار عند درجة حرارة $100°C$ عند تكاثفه إلى ماء عند $100°C$؟

36. (I) قدّر التغير في القصور الحراري لـ 1 kg من الماء عند تسخينه من $0°C$ إلى $100°C$.

37. (I) ما التغير في القصور الحراري لـ $1.00\ m^3$ من الماء عند $0°C$ عندما يتجمد إلى ثلج عند $0°C$؟

38. (II) ما التغير الكلي في القصور الحراري خلال عملية تجمد $1.00\ m^3$ من المادة عند $0°C$ ثم عملية تبريد إلى $-10°C$ نتيجة ملامسته لكتلة هائلة جداً من الثلج عند $-10°C$؟

39. (II) ينزلق صندوق كتلته 10.0 kg بسرعة ابتدائية مقدارها 3.0 m/s على سطح طاولة خشن إلى أن يقف وقوفاً كاملاً. قدّر التغير الكلي في القصور الحراري للكون. افترض أن درجة حرارة الأجسام جميعها هي درجة حرارة الغرفة (293 K).

40. (II) تمتلك صخرة هاوية طاقة حركية KE قبل اصطدامها مباشرة بسطح الأرض. ما التغير الكلي في القصور الحراري للصخرة ومحيطها الناجم عن التصادم؟

41. (II) يوصل عمود من الألمنيوم حرارة بمعدل 7.50 cal/s من مصدر للحرارة درجة حرارته $240°C$ إلى كتلة مائية درجة حرارتها $27°C$. احسب معدل ازدياد القصور الحراري لكل وحدة زمن خلال هذه العملية.

42. (II) مُزج 1.0 kg من الماء درجة حرارته $30°C$ مع 1.0 kg من الماء درجة حرارته $60°C$ في وعاء معزول تماماً. قدر محصلة التغير في القصور الحراري للنظام.

43. (II) وضعت قطعة من الألمنيوم كتلتها 3.8 kg، ودرجة حرارتها $30°C$ في 1.0 kg من الماء داخل وعاء مصنوع من مادة الستايروفوم عند درجة حرارة الغرفة ($20°C$). احسب محصلة التغير التقريبي في القصور الحراري للنظام.

44. (III) تنتج آلة حرارية حقيقية تعمل بين خزاني حرارة درجتا حرارتهما 970 K و650 K مقدار 550 J من الشغل خلال كل دائرة عندما تكون الحرارة المدخلة 2200 J.(أ) قارن بين كفاءة هذه الآلة الحقيقية وآلة (كارنو) المثالية. (ب) احسب التغير الكلي للقصور الحراري للكون خلال الدورة الواحدة للآلة الحقيقية. (جـ) احسب التغير الكلي للقصور الحراري للكون خلال الدورة الواحدة لآلة كارنو تعمل بين درجتي الحرارة المعلنتين نفسيهما.

*15 - 11 تفسير إحصائي

*45. (II) احسب الاحتمالات الناتجة من إلقاء حجري نرد والحصول على (أ) 5. (ب) 11.

*46. (II) رتب خمس أوراق لعب حسب ازدياد احتمالية الحصول على: (أ) شيخ وأربع واحدات. (ب) الرقم 6 مع قلب، والرقم 8 مع شكل هندسي "معين" (ديناري) والملكة الزيتونية، والرقم 3 مع القلب والولد الشجري. (جـ) ولدين وملكتين وواحدات (د) أي خمس أوراق دون تكرارٍ لأيّ رقم. ناقش ترتيبك بالنسبة إلى الحالات دون المجهرية والجاهرية.

*47. (II) افترض أنّك تقوم بخلط ست قطع نقدية معدنية في يدك، ثم ترمي هذه القطع على سطح الطاولة. ابنِ جدولاً يظهر عدد الحالات دون المجهرية لكل حالة جاهرية. وما احتمالية الحصول على: (أ) ثلاث صور وثلاث كتابات. (ب) ست صور؟

*15 – 12 مصادر الطاقة

*48. (I) تستطيع الخلايا الضوئية (الشكل 15 – 26) إنتاج حوالي 40 W من الكهرباء من كلّ مترٍ مربّع من مساحة سطحية في مواجهة الشمس مباشرة. ما مساحة الخلايا الضوئية الضرورية إذا كانت حاجة المنزل هي 22 kWh/day؟ وهل يكفي سطح منزل متوسط المساحة لاحتواء هذه الخلايا؟ (افترض أن الشمس تبقى مضيئة 9 ساعات يوميًا).



الشكل **15** - **26** (مسألة 48).

*49. (II) يمكن أن تخزن الطاقة لاستخدامها خلال ساعات الذروة عن طريق ضخ المياه إلى خزان مرتفع خلال فترات انخفاض الطلب، ومن ثمّ تركها لتحرك المولدات عند الحاجة. افترض أنّ المياه تضخ إلى بحيرة على ارتفاع 135 m فوق مستوى المولدات بمعدّل 1.00×10^5 kg/s مدّة 10.0 ساعات خلال الليل: (أ) ما مقدار الطاقة (kW/h) اللازم لعمل هذا خلال كلّ ليلة؟ (ب) ما متوسط القدرة الناتجة عند تحريرها خلال 14 ساعة نهارًا وبكفاءة 75%؟

*50. (II) تخزن المياه في بحيرة اصطناعية خلف سد (الشكل 15 – 27). إذا كان عمق المياه قرب السد 45 m، ومعدل انسياب المياه على المولدات الكهرومائية $35\ m^3/s$، فما القدرة الكهربائية المولدة؟



الشكل **15** - **27** (مسألة 50).

مسائل عامة

51. يدّعي مطوّر أنّه صمّم وبنى آلة قادرة على بذل 1.50 MW من الشغل النافع ينتج عند امتصاصها 3.00 MW من الطاقة الحرارية عند درجة حرارة 425 K، وإخراجها 1.50 MW من الطاقة الحرارية عند درجة حرارة 215 K. هل هناك مغالطة في ادعائه؟ وضّح إجابتك.

52. لوحظ أنّ حجم الغاز المعبأ في أسطوانة ذات مكبس خفيف عديم الاحتكاك سيزداد من $1.9\ m^3$ إلى $4.1\ m^3$ عند إضافة 5.30×10^5 J من الحرارة إليه. احسب: (أ) الشغل الذي سيبذله الغاز. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز. ثم ارسم هذه العملية على مخطط PV.

53. كفاءة آلة ذات 4 أسطوانات تعمل على البنزين هي 0.25. وتولد هذه الآلة شغلاً مقداره 220 J خلال الدورة الواحدة في كل أسطوانة. عندما تشتغل الآلة بمعدل 45 دورة لكل ثانية: (أ) ما الشغل المبذول خلال الثانية الواحدة؟ (ب) ما الحرارة الكلية المدخلة من الوقود خلال كل ثانية؟ (جـ) إذا كان المحتوى الحراري للبنزين 35 MJ لكلّ لتر، فما فترة ديمومة اللتر الواحد؟

54. تمتص ثلاجة "كارنو" (وهي عكس آلة كارنو) الحرارة من غرفة البراد عند درجة حرارة $-17°C$، وتطرد الحرارة إلى داخل الغرفة عند $25°C$. (أ) ما الشغل الذي يجب أن تبذله الثلاجة لتحويل 0.50 kg من الماء عند $25°C$ إلى ثلج عند $-17°C$؟ (ب) إذا كان ناتج الضاغط 210 W، فما أقلّ زمن ضروري للقيام بالمهمة السابقة؟

55. لقد اقترح أن يتم تطوير آلة حرارية تستخدم الاختلاف في درجات الحرارة بين الماء الموجود قرب سطح المحيط والماء الموجود على عمق عدة مئات من الأمتار تحت السطح. وربما تكون درجة الحرارة بين مداري السرطان والجدي هي $27°C$ و$4°C$ على الترتيب. (أ) ما الكفاءة العظمى الممكنة لآلة كهذه؟ (ب) لماذا تعدّ آلة من هذا النوع ممكنة بالرغم من انخفاض كفاءتها؟ (جـ) هل يمكنك أن تتخيل حدوث أي آثار بيئية سيئة؟

56. سيارتان كتلة كلّ منهما 1100 kg، تُسافران بسرعة 95 km/h في اتجاهين متعاكسين، إذا اصطدمتا ببعضهما بعضًا ووقفتا وقوفًا كاملاً، فقدر التغير في القصور الحراري للكون نتيجة التصادم. افترض أن درجة الحرارة T=20°C

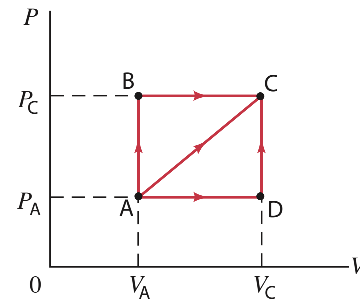
57. مُلِئ كوب ألمنيوم معزول كتلته 120 g، ودرجة حرارته 15°C بماء كتلته 140 g، ودرجة حرارته 50°C. واستغرق النظام عدة دقائق ليصل بعدها إلى الاتزان. (أ) حدد درجة الحرارة النهائية . (ب) قدر التغير الكلي في القصور الحراري.

*__58.__ (أ) ما معامل الأداء لمضخة حرارة مثالية تأخذ الحرارة من هواء خارجي درجة حرارته 6°C، لتزود المنزل في الداخل بطاقة حرارية عند 24°C؟ (ب) إذا كانت هذه المضخة تعمل على قدرة كهربائية قدرها 1200 W، فما الطاقة الحرارية العظمى القادرة على رفد المنزل بها خلال كل ساعة؟

59. يطلق احتراق البنزين في السيارة نحو 3.0×10^4 kcal/gal إذا كان متوسط أداء السيارة 41 km/gat عندما تسير بسرعة 90 km/h، وهو ما يتطلب 25 hp، فما كفاءة هذه الآلة تحت هذه الظروف؟

60. إذا كانت درجة الحرارة المنخفضة T_L لآلة كارنو 20°C، وكفاءتها تعادل 30%، فما مقدار الزيادة الضرورية في درجة الحرارة المرتفعة T_H للآلة كي تصل إلى كفاءة تعادل 40%؟

61. احسب الشغل المبذول بواسطة غاز مثالي عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة C في (الشكل 15 – 28) لكلّ من العمليات التالية: (أ) ADC، (ب) ABC، (جـ) AC مباشرة.



الشكل **15 - 28** (مسألة 61).

62. تولّد محطة كهربائية تعمل بكفاءة 33% قدرة كهربائية قدرها 850 MW، وتستخدم أبراج التبريد للتخلّص من الحرارة الناتجة. (أ) قدر حجم الهواء (km^3) المُسخّنُ خلال اليوم إذا سمح لدرجة الحرارة بالارتفاع 7.0°C، وهل سترتفع درجة الحرارة المحلية بصورة واضحة؟ (ب) إذا تكونت طبقة من الهواء الساخن بسمك 200 m، فقدر المساحة التي ستغطيها هذه الطبقة خلال 24 h من عمل المحطة. افترض أن كثافة الهواء 1.2 kg/m^3، وحرارته النوعية حوالي 1.0 kg/J.°C عند ضغط ثابت.

63. افترض أنّ محطة طاقة تولد 980 MW باستخدام مولدات بخارية. ويدخل البخار المسخن إلى 625 K إلى المولدات، ويتم التخلص من الحرارة غير المستخدمة إلى النهر عند 285 K. افترض أن المولدات تعمل كآلة كارنو مثالية. (أ) قدر متوسط ارتفاع درجة حرارة مياه النهر مباشرة بالقرب من محطة التوليد إذا علمت أنّ معدل انسياب النهر $37\ m^3/s$. (ب) ما الازدياد في القصور الحراري لكل كيلو غرام من مياه النهر بالقرب من محطة التوليد مباشرةً بدلالة J/kg·K؟

64. يعمل محرك سيارة قدرته 100 حصان بكفاءة 15%. افترض أن درجة حرارته الباردة (العادم) 85°C، ودرجة حرارته الساخنة (المدخلة) 495°C (درجة حرارة انفجار مزيج الوقود والهواء) . (أ) ما النسبة بين كفاءة هذه الآلة وكفاءة (كارنو) العظمى الممكنة؟ (ب) قدر كمية القدرة (بالواط) التي ستعمل على تحريك السيارة، وكذلك مقدار الحرارة (بدلالة الجول والكيلو سعر) التي ستطردها للهواء خلال ساعة واحدة.

65. وُضِعَ غاز مثالي في زجاجة أسطوانية طويلة مساحة مقطعها العرضي $0.080\ m^2$ ووضع مكبس متحرك عديم الاحتكاك كتلته 0.10 kg رأسياً داخل الزجاجة بحيث يعملُ ضغط الغاز داخل الزجاجة على تحمل وزن المكبس. وعند تسخين الغاز (تحت ضغط ثابت) من 25°C إلى 55°C ارتفع المكبس مسافة 1.0 cm. ما مقدار الحرارة اللازم لهذه العملية؟ افترض ضغطا جويا معياريا في الخارج.

66. يزود 1.0 kg من الدهون الجسم بـ 3.7×10^7J من الطاقة الداخلية. (أ) ما مقدار الدهون التي سيحرقها الجسم في يوم واحد للمحافظة على درجة حرارة شخص مستلق على سريره ومتوسط معدل أيضه 95 W؟ (ب) ما الفترة الزمنية الضرورية لحرق 1.0 kg من الدهون في هذه المدة؟

67. يحافظ جهاز تكييف مثالي على درجة حرارة الغرفة عند 21°C، أمّا درجة الحرارة خارج الغرفة فهي 32°C. ما مقدار التوفير في القدرة الكهربائية الناتج من عزل زجاج نوافذ الغرفة عن أشعة الشمس المباشرة، وانخفاض القدرة النافذة من الشمس إلى الغرفة من 5.3 kW إلى 500 W؟

68. يعدّ "المجفف" ثلاجة ذات باب مفتوح، حيث يتم سحب الهواء الرطب إلى الداخل بواسطة مروحة، ثم يُمرَّر على ملف بارد فتتكثف قطرات الماء من الهواء. وبعد فصل الماء عن الهواء، تعود درجة حرارة الهواء إلى ما كانت عليه من الدفء، ثم يطرد الهواء إلى الغرفة. ونتيجة تصميم المجفف بطريقة مثالية، يتم تبادل الحرارة بين الهواء الداخل والخارج. وفي هذه الطريقة، فإن الحرارة التي يزيلها ملف الثلاجة تأتي في معظمها من تكاثف بخار الماء في الهواء إلى سائل. قدّر كمية بخار الماء المزال خلال ساعة واحدة بواسطة المجفف إذا كانت درجة حرارة الغرفة 25°C. علماً بأنّ الماء يتكاثف عند 8°C ومعدل بذل المجفف للشغل 600 W من القدرة الكهربائية.

إجابات التمارين

أ. 700 J.

ب. أقل.

جـ. -6.8×10^3 J.

د. تطبق (المعادلة 14 – 1) على الغاز المثالي أحادي الذرة فقط ولا تطبق على الماء السائل.



صورة "لينو لاسيديللي" على قمة K2، وقام بتصويره "أشيللي كومبانوني" في يوليو 1954 ليُسجِّل بذلك أول تسلقٍ لثاني أعلى قمة (مبينة على الغلاف الخارجي لهذا الكتاب) والتي اعتبرت الأصعب بين الجبال الأعلى ذات القمم شاهقة الارتفاع، 8000 متر. انظر الجدول 1 - 6 والمثال 1 - 3 . ومضى 23 عاماً قبل أن يتم تسلق K2 للمرة الثانية.



اكتسب هذا المشط شحنة كهربائية ساكنة ناجمة إمّا بسبب مروره خلال الشعر، أو دلكه بقطعة قماش أو بمنديل ورقي. الشحنة الكهربائية على المشط تحثّ الاستقطاب (فصل الشحنات عن بعضها) في قصاصات من الورق "فتجذبها". يتناول تقديمنا للكهرباء في هذا الفصل الموصلات، والعوازل، وقانون كولوم الذي يوضع الثلاثة بين القوة بين شحنتين نقطيتين والمسافة الفاصلة بينهما. كما سنقدم المفهوم الفاعل للمجال الكهربائي.

الفصل 16

الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي

ربّما تستحضر كلمة "كهرباء" صورة للتقنية العصرية المعقدة؛ أضواء إنارة، ومحركات، وإلكترونيات وحواسيب. ومع هذا، فقد يكون للقوة الكهربائية دور أعمق من هذا في حياتنا. وبناءً على النظرية الذرية، فإنّ القوّة الكهربائية بين الذرات أو الجزيئات هي المسؤولة عن إبقائها معًا لتتكون عندئذ المواد السائلة والصلبة. كما ترتبط القوة الكهربائية أيضًا بالعمليات الأيضية التي تحدث داخل أجسامنا. وينتج كثير من القوى التي تعاملنا معها إلى الآن من قوى كهربائية تعمل على المستوى الذري مثل: القوى المرنة، والقوى العمودية، والاحتكاك، وقوى التلامس الأخرى (مثل الدفع والسحب). ومن جانبٍ آخر، تعدّ الجاذبية قوة مختلفة.*

وتعود الدراسات الأولى للكهرباء إلى الأزمان القديمة، ومع هذا لم تدرس بالتفصيل إلّا في القرنين السابقين. وسنناقش تطور الأفكار حول الكهرباء بما فيها الأجهزة العملية، وكذلك علاقتها بالمغناطيسية خلال الفصول السبعة القادمة.

* وكما ناقشنا في (البند 5 – 10) . فإن الفيزيائيين في القرن العشرين استطاعوا التعرف إلى أربع قوى أساسية في الطبيعة هي: (1) قوة الجاذبية. (2) القوة الكهرومغناطيسية (سنرى لاحقًا الترابط القوي بين الكهرباء والمغناطيسية). (3) القوة النووية القوية. (4) القوة النووية الضعيفة. وتعمل القوتان النوويتان القوية والضعيفة على مستوى نواة الذرة. وهناك نظرية حديثة جمعت بين القوتين الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة ليعدّ مصدرهما واحدًا يُعرفُ بالقوة الكهروضعيفة . وسنناقش هذه القوى في الفصول القادمة.

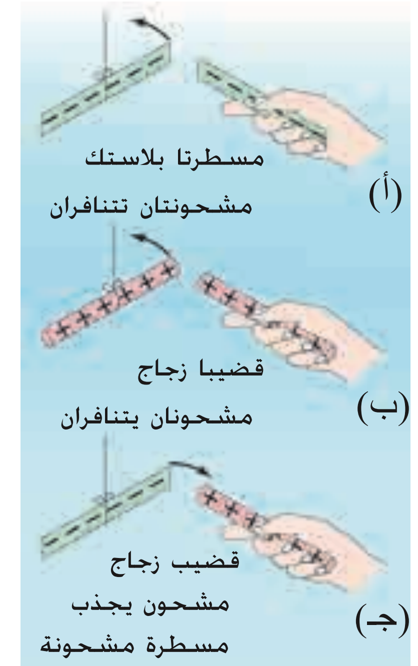


الشكل 16 – 1 (أ) ادلك مسطرة بلاستيكية. (ب) قربها من قصاصات صغيرة من الورق.

1-16 الكهرباء الساكنة والشحنة الكهربائية وحفظها

جاءت كلمة كهرباء من الكلمة اليونانية إلكترون التي تعني الكهرمان الذي هو صمغ شجري متحجر. وقد عرف القدماء أنّ دلك قطعة من الكهرمان بواسطة قطعة قماش يجعله قادرًا على جذب أجزاء صغيرة من الغبار أو أوراق الشجر. وكذلك عند دلك قطعة من المطاط الصلب، أو عمود من الزجاج، أو مسطرة بلاستيكية بقطعة قماش سيظهر "تأثير الكهرمان" أو **الكهرباء الساكنة** كما ندعوها في الوقت الحالي. وتستطيع أن تلتقط قصاصات صغيرة من الورق بواسطة مشط أو مسطرة بلاستيكية دلكتها للتو بشدّة بمنديل ورقي. انظر الصورة على الصفحة السابقة، و(الشكل 16 – 1) أيضًا. ربّما شعرت بالكهرباء الساكنة عند تمشيط شعرك، أو عندما تناولت قميصاً أو قطعة ملابس من آلة تجفيف الملابس. وربّما تكون قد شعرت بصعقة عند لمس مقبض الباب الفلزي بعد انزلاقك على مقعد السيارة، أو مشيك على سجادة تدخل مادة النايلون في تركيبها. وفي كل حالة، يصبح الجسم "مشحونًا" نتيجة للدلك. ويقال عندها أنه يمتلك شحنة **كهربائية صافية**.

الشكل 16 – 2 الشحنات المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب.



هل الشحنات جميعها متماثلة؟ أم أنّ هناك أكثر من نوع من الشحنات؟ في الحقيقة هناك نوعان مختلفان من الشحنات الكهربائية كما تظهر التجربة البسيطة التالية. تعلق مسطرة بلاستيكية بعد دلكها بشدة بواسطة قطعة من الملابس لشحنها. وعند تقريب مسطرة أخرى شُحِنت بالطريقة نفسها من المسطرة الأولى، وُجِد أنّ المسطرة الأولى تتنافر مع المسطرة الثانية . وهذا مبينٌ في (الشكل 16 – 2 أ). وبالمثل، فعند تقريب عمود زجاجي مشحون من عمود زجاجي آخر تمّ دلكه، فإن العمودين سيظهران قوة تنافر كما في (الشكل 16 – 2 ب). ولكن عند تقريب عمود الزجاج المشحون من المسطرة البلاستيكية المشحونة، وجد أنهما ينجذبان إلى بعضهما بعضا كما في (الشكل 16 – 2 جـ). وعليه، فإن الشحنة على الزجاج يجب أن تكون مختلفة عن تلك التي على البلاستيك. وبالفعل، فقد وُجِد عمليًا أن الأجسام المشحونة جميعها تتبع أحد التصنيفين؛ فإمّا أنها تنجذب إلى الزجاج وتتنافر مع البلاستيك، أو أنها تتنافر مع الزجاج وتنجذب إلى البلاستيك. لذا، يبدو أنّ الشحنات الكهربائية تنقسم إلى نوعين فقط. وكل نوع من الشحنات يتنافر مع الشحنات المشابهة لنوعه، وينجذب إلى الشحنات المعاكسة لنوعه؛ أيْ أنّ **الشحنات المختلفة تتجاذب والشحنات المتشابهة تتنافر**.

الشحنات المتشابهة تتنافر والشحنات المختلفة تتجاذب.

أشار العالِم الفيلسوف الأمريكي فرانكلين (1706 – 1790) إلى هاتين الشحنتين بالموجبة والسالبة. وكان التمييز بين الموجب والسالب أمرًا اعتباطيًّا، فوقع اختيار فرانكلين على أن الشحنة على عمود الزجاج المدلوك موجبة وعليه، فإن الشحنة على المسطرة البلاستيكية المدلوكة (أو الكهرمان) هي السالبة. وما زال هذا التعريف متبعًا إلى يومنا هذا.

وجادل فرانكلن بأنّه عندما يتولد أي مقدار من الشحنة على جسم ما، فإنّ مقدارًا متساويًا من الشحنة المضادة سيتكون على الجسم الآخر. ويجب أن تعامل الشحنات الموجبة والسالبة جبريًّا؛ أيْ أنّ التغير الصافي في مقدار الشحنة المتولدة يساوي صفرًا. وعلى سبيل المثال، فعند دلك مسطرة بلاستيكية بمنديل ورقي سنجد أن البلاستيك سيكتسب شحنة سالبة، أمّا المنديل فسيكتسب شحنة موجبة مساوية لها. ومع أنّ الشحنات تنفصل عن بعضها بعضًا إلا أنّ مجموعها يبقى صفرًا.

وهناك مثال على قانون أصبح مطوّرًا الآن بشكلٍ جيّدٍ هو **قانون حفظ الشحنة الكهربائية** الذي صيغ كالتالي:

الشحنة الكهربائية الصافية المتولدة في أيّ عملية تساوي صفرًا.

كما يمكن صياغته بشكل آخر كما يلي :

لا يمكن لأي شحنة صافية أن تخلق أو تفنى.

قانون حفظ الشحنة الكهربائية

وإذا اكتسب جسم ما (أو حيّز) شحنة موجبة، فإن مقدارًا مساويًا من شحنة سالبة سيتم العثور عليه في أجسام أو مناطق مجاورة. وحتى الآن، لم تخالف أي عملية هذا القانون فبقي صامدًا بصلابة تمامًا مثل قانون حفظ الطاقة والزخم.

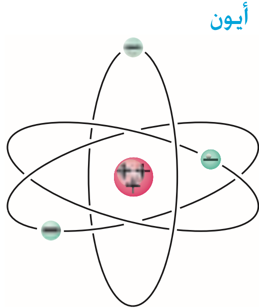
2-16 الشحنة الكهربائية في الذرة

لقد أصبح واضحًا خلال القرن الماضي فقط أن الفهم الصحيح للكهرباء يبدأ من داخل الذرة نفسها. وسنناقش التركيب الذري في الفصول القادمة إضافة إلى الأفكار التي أفضت إلى فهمنا الحالي ورؤيتنا للذرة بتفصيل أكبر.

الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات

يبين النموذج المبسط للذرة أنها تمتلك نواة صغيرة جدًّا. ومع هذا، فهي ثقيلة نسبيًّا ومشحونة بشحنة موجبة. ويحيط بها إلكترون أو أكثر مشحون بشحنة سالبة (الشكل 16 – 3). وتحتوي النواة على بروتونات مشحونة بشحنة موجبة، ونيوترونات متعادلة كهربائيًّا. وتملك البروتونات جميعها والإلكترونات كلّها مقدار الشحنة الكهربائية نفسه مع اختلاف في إشارتيهما . لذلك، فإن الذرات المتعادلة لا تملك شحنات صافية؛ لأنها تحتوي على عددٍ متساوٍ من البروتونات والإلكترونات. ويمكن لذرة في بعض الأحيان أن تفقد إلكترونًا أو أكثر، أو أن تكسب إلكترونات إضافية لتصبح لها شحنة صافية موجبة أو سالبة، وتدعى عندئذ الأيون.

أيون



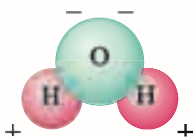
الشكل 16 – 3 نموذج مبسط للذرة.

وتميل الأنوية في المواد الصلبة إلى البقاء قرب مواضع ثابتة، في حين يمكن لبعض الإلكترونات التحرك بحرية. وعندما يكون الجسم متعادلًا كهربائيًّا، فإنّ شحناته السالبة تكون معادلة لشحناته الموجبة. ويمكن تفسير شحن جسم صلب عن طريق دلكه بانتقال الإلكترونات من أحد الجسمين إلى الآخر. فعندما تصبح المسطرة البلاستيكية مشحونة بشحنة سالبة نتيجة دلكها بمنديل ورقي، فإن انتقال الإلكترونات من المنديل إلى البلاستيك يترك المنديل مشحونًا بشحنة موجبة مقدارها يساوي مقدار الشحنة السالبة التي يكتسبها البلاستيك. وتستطيع الأنوية والأيونات في السوائل والغازات أن تتحرك تمامًا مثل الإلكترونات.

جزيء قطبي

إنّ احتفاظ المواد المشحونة- بطريقة الدلك- بشحناتها لفترة محدودة لتعود بعدها إلى التعادل الكهربائي يعدّ أمرا طبيعيا. ويصبح السؤال هو: أين تذهب الشحنات؟ وعادة ما "تتسرب" هذه الشحنات على جزيئات الماء في الهواء لأنّ جزيئات الماء **قطبية** – أي أنه وعلى الرّغم من أنّ جزيئات الماء متعادلة كهربائياً إلا أن شحناتها غير موزعة بانتظام (الشكل 16 – 4). ولهذا، فإن الإلكترونات الزائدة - ولنقل على المسطرة البلاستيكية المشحونة - "ستتسرب" إلى الهواء نتيجة انجذابها إلى النهايات الموجبة لجزيئات الماء. إلى جانب أنّ الجسم المشحون بشحنة موجبة يمكن أن يصبح متعادلا كهربائيًّا عند انتقال الإلكترونات ضعيفة الارتباط بجزيئات الماء في الهواء إليه.

الشكل 16 – 4 رسم لجزيء ماء. ويسمى بالجزيء القطبي نظراً لامتلاكه شحنات مختلفة الإشارة عند النهايات المختلفة.



ويمكن ملاحظة تأثير الكهرباء الساكنة في الأيام الجافة أكثر نظرًا لوجود عدد قليل من جزيئات الماء الموجودة في الهواء والتي تسمح بتسرب الشحنات. وأيضًا هناك صعوبة كبيرة خلال الأيام المطيرة أو ذات الرطوبة العالية في إرغام المواد بالاحتفاظ بشحنات صافية لفترة طويلة.

3-16 الموصلات والعوازل

لنفترض أنّ هناك كرتين فلزيتين إحداهما مشحونة بشحنة كبيرة، والأخرى متعادلة كهربائيا (الشكل 16 – 5 أ). إذا وضعنا جسمًا فلزيًّا مثل المسمار يلامس الكرتين معًا (الشكل 16 – 5 ب) فإنه سيعمل على شحن الكرة غير المشحونة بسرعة كبيرة. وفي المقابل، لو أننا وصلنا الكرتين السابقتين بعمود خشبي أو بقطعة من المطاط بدلاً من المسمار (الشكل 16 – 5 جـ) فإن الكرة غير المشحونة لن تصبح مشحونة بشكل واضح. وعليه، فإن المواد مثل المسمار يطلق عليها مصطلح **موصلات كهربائية**. أمّا المواد الأخرى مثل الخشب والمطاط فيطلق عليها مصطلح غير موصلات أو **عوازل**.

موصلات وعوازل



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل 16 – 5 (أ) كرة فلزية مشحونة وكرة فلزية أخرى متعادلة. (ب) الكرتان موصولتان بواسطة موصل (مسمار فلزي) يعمل على إيصال الشحنات من كرة إلى أخرى. (جـ) وُصِلَتِ الكرتان بواسطة عازل. لذا، لم تنتقل الشحنات.

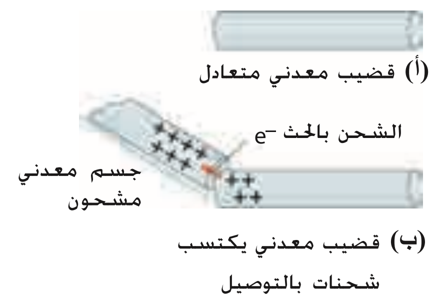
الفلزات موصلات جيدة

تعدّ الفلزات - بشكل عام- موصلات جيّدة. إلّا أنّ معظم المواد الأخرى تعدّ عوازل (على الرغم من أن العوازل توصل الكهرباء ولكن بمقدار ضئيل جدًّا). إنّ معظم المواد تقريبًا تندرج ضمن أحد التصنيفين المميزين تماماً عن بعضهما بعضا. ومع هذا، فإنّ هناك عددًا قليلًا جدًّا من المواد ومن ضمنها (السيليكون والجرمانيوم) تصنف كنوع متوسط بين التصنيفين السابقين يسمى **أشباه الموصلات.**

ومن وجهة نظر ذرية، فإنّ ارتباط الإلكترونات بالنواة في المادة العازلة يكون قويا. وفي المقابل، فإن بعض الإلكترونات في الموصل الجيد تكون ضعيفة الارتباط، وتستطيع أن تتحرك بحرية خلال المادة (بالرغم من عدم قدرتها على مغادرة الجسم بسهولة) ويشار إليها عادةً بالإلكترونات الحرة أو إلكترونات التوصيل. وعندما يُقرب جسمٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ من موصلٍ أو عندما يلامسه، فإن الإلكترونات الحرّة في الموصل ستُجذب بواسطة هذا الجسم موجب الشحنة وتتحرك بسرعة باتجاهه. ومن ناحية أخرى، فإن الإلكترونات الحرّة ستتحرك بسرعةٍ هائلةٍ مبتعدةً عن جسم مشحون بشحنة سالبة عندما يقترب منها. وهناك عدد أقل بكثير من الإلكترونات الحرة في شبة الموصل، ويكاد هذا العدد أن يكون معدومًا في العازل.

4-16 الشحنة المستحثة والمكشاف الكهربائي

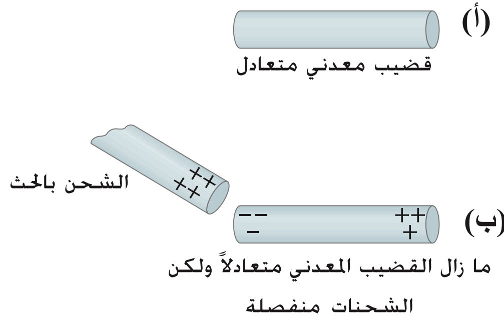
لنفترض أن جسمًا فلزيًّا مشحونًا بشحنة موجبة قد قُرّب من جسم فلزي آخر غير مشحون. فإذا تلامس الجسمان، فإن الإلكترونات الحرة في الجسم المتعادل كهربائيًّا ستنجذب إلى الجسم المشحون بشحنة موجبة وتعبر إليه (الشكل 16 – 6).



الشكل 16 – 6 عمود فلزي متعادل كهربائياً في (أ) سيكتسب شحنة موجبة عند وضعه ملامساً (ب) مع جسم فلزي مشحون بشحنة موجبة. (تتحرك الإلكترونات كما هو موضح بالسهم البرتقالي). ويسمى هذا شحنا بالتوصيل.

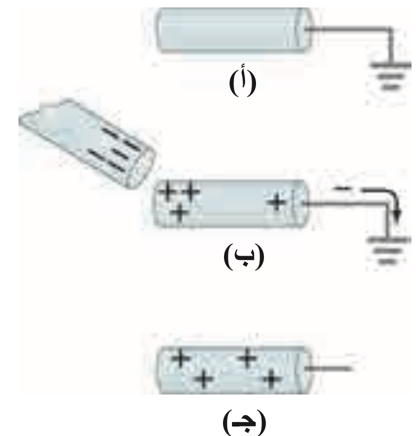
وبما أن الجسم الآخر متعادل كهربائيًّا أصلا، فإن فقدانه لبعض إلكتروناته السالبة سيجعله يمتلك شحنة موجبة صافية. وتسمّى هذه العملية "الشحن عن طريق التوصيل" أو "التلامس"، ويصبح بعدها الجسمان مشحونين بشحنتين متشابهتين.

وافترض أن جسمًا مشحونًا بشحنة موجبة قد تم وضعه بالقرب من عمود فلزي متعادل كهربائيًّا دون أن يلامسه. فعلى الرغم من أن إلكترونات العمود المعني الحرة لن تغادره، إلا أنها ستتحرك داخل الفلز باتجاه الشحنة الخارجية الموجبة تاركة الشحنات الموجبة عند الطرف الآخر للعمود (الشكل 16 – 7). ويقال عندها بأن الشحنة تم حثها عند نهايتي العمود الفلزي. وعلى الرّغم من عدم توليد أي شحنات صافية في العمود، إلاّ أنّ الشحنات قد تم فصلها عن بعضها. ولا تزال الشحنات الصافية في العمود الفلزي تعادل صفرا. وبالرغم من ذلك، فلو انقسم الفلز إلى قسمين، فسنحصل على جسمين مشحونين أحدهما مشحون بشحنة موجبة والآخر بشحنة سالبة.



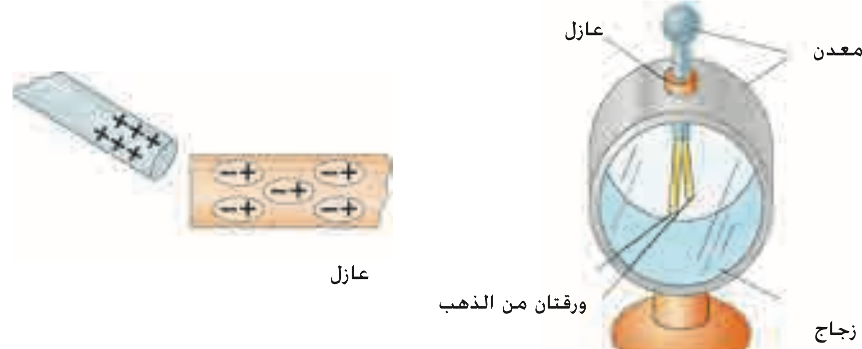
الشكل 16 – 7 الشحن عن طريق الحثّ

الشكل 16 – 8 حثّ شحنة على جسم مُتصل بالأرض.



هناك طريقة أخرى لحثّ شحنة صافية على جسم فلزي من خلال توصيل الجسم بالأرض بواسطة سلك موصل (أو أنبوب فلزي ينتهي داخل الأرض) كما هو مبين في (الشكل 16 – 8 أ) (ويعني الرمز ⏚ الإيصال "بالأرض"). ويسمى الجسم عندها بأنه "أُرِّضَ" أو "أُدِّم". ونظرًا لكبر حجم الأرض وقدرتها على التوصيل، فإنها قادرة على استيعاب عدد ما من الإلكترونات أو التخلي عنها؛ أي أنّها تتصرف وكأنها خزان كبير من الشحنات. وإذا وضع جسم مشحون بشحنة سالبة هذه المرة بالقرب من جسم فلزي، فإن الإلكترونات الحرة في الفلز ستطرد بعيدًا، وسينتقل عدد كبير منها خلال السلك إلى الأرض (الشكل 16 – 8 ب). مما سيترك الفلز مشحونًا بشحنة موجبة. وإذا قطع السلك بعد ذلك، فإن الجسم الفلزي سيمتلك شحنة موجبة مستحثة عليه (الشكل 16 – 8 جـ). ولكن إذا قُطع السلك بعد إبعاد الجسم المشحون بشحنة سالبة، فإنّ الإلكترونات ستتحرك عائدة إلى الجسم الفلزي، ليصبح الجسم عندئذٍ متعادلًا كهربائيًّا.

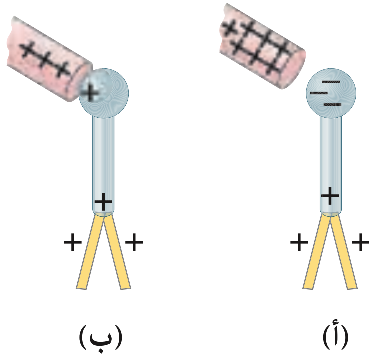
ويمكن فصل الشحنات أيضًا في غير الموصلات. وإذا وضعت جسمًا مشحونًا بشحنة موجبة بالقرب من جسم غير موصل ومتعادل كهربائيًا كما هو مبين في (الشكل 16 – 9). فلن يتحرّك أيُّ إلكترون (تقريبًا) بحرية خلال الجسم غير الموصل. ومع هذا، فيمكن لهذه الإلكترونات أن تتحرك قليلاً خلال ذراتها أو جزيئاتها. يمثّل كلّ شكلٍ بيضوي في (الشكل 16 – 9) جزيئاً (الأبعاد غير حقيقية). وتميل الإلكترونات سالبة الشحنة والمنجذبة إلى الشحنات الموجبة الخارجية إلى التحرك باتجاه الشحنات الموجبة وهي داخل جزيئاتها. وبسبب أنّ الشحنات السالبة في غير الموصل هي الأقرب إلى الشحنات الخارجية الموجبة، فإن غير الموصل سينجذب بجمله إلى الشحنات الموجبة الخارجية (انظر الصورة في بداية هذا الفصل صفحة 439).



الشكل 16 – 9 يتسبب جسم مشحون وُضع بالقرب من عازل بفصل الشحنات عن بعضها داخل جزيئات العازل.

الشكل 16 – 10 المكشاف الكهربائي

إنّ **المكشاف الكهربائي** جهاز يمكن استخدامه للكشف عن الشحنات. وكما هو مبين في (الشكل 16 – 10)، هناك ورقتان فلزيتان (غالباً من الذهب) قابلتان للتحرك داخل وعاء. (في بعض الأحيان تكون ورقة واحدة فقط منهما قابلة للحركة). وتكون الورقتان متصلتين بواسطة موصل إلى مقبض فلزي خارج الوعاء ومعزولتين عن جسمه. وعندما يقترب جسم مشحون بشحنة موجبة من المقبض الفلزي فإن هذا يحثّ على الفصل بين الشحنات: تُجذب الإلكترونات نحو الأعلى خلال المقبض لتترك الشحنات الموجبة خلفها (الشكل 16 – 11 أ). تتنافر الورقتان كما هو مبين في الشكل لأنهما مشحونتان بشحنتين موجبتين متشابهتين. أما إذا كان المقبض مشحونًا عن طريق التوصيل، فإن الجهاز ككل سيكتسب شحنة صافية كما هو مبين في (الشكل 16 – 11 ب). وفي الحالتين، كلما ازداد مقدار الشحنات ازدادت المسافة الفاصلة بين الورقتين.



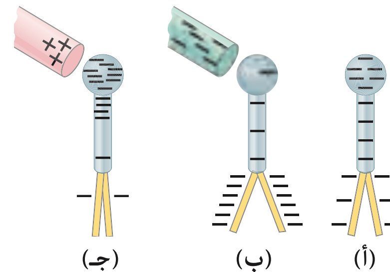
الشكل 16 – 11 شحن المكشاف الكهربائي عن طريق (أ) الحث. (ب) التوصيل.

لاحظ أنّك لا تستطيع التمييز بين إشارات الشحنات باستخدام هذه الطريقة؛ لأنّ الشحنات السالبة ستعمل على تنافر الورقتين وابتعادهما عن بعضهما تماماً مثلما تعمل كمية مساوية من الشحنات الموجبة. وفي الحالتين ستتنافر الورقتان مع بعضهما بعضًا. ومع هذا، يمكن استخدام المكشاف الكهربائي لتحديد إشارة الشحنة إذا تمّ شحنه بداية عن طريق التوصيل، ولنقل بشحنة سالبة كما هو في (الشكل 16 – 12 أ). والآن، إذا تم تقريب جسم سالب كما في (الشكل 16 – 12 ب)، فإنّ عدداً أكبر من الإلكترونات ستحثّ لتتحرك نحو الأسفل إلى الورقتين لتبتعدا عن بعضهما أكثر وأكثر. أمّا إذا تمّ تقريب شحنة موجبة، فإن الإلكترونات ستستحثّ لتنساب نحو الأعلى لتترك الورقتين خلفها مشحونتين بشحنة سالبة أقل بالمقدار مقارنة مع ما كانت عليه لتقترب الورقتان من بعضهما، وليقل التنافر فيما بينهما (شكل 16 – 12 جـ).

لقد استخدم المكشاف الكهربائي كثيرا في بداية دراسة الكهرباء. واستخدم المبدأ نفسه بمساعدة بعض الدارات الإلكترونية في أجهزة **القياس الإلكترونية** الحساسة جدًّا والحديثة.

جهاز قياس إلكتروني

الشكل 16 – 12 يمكن لجهاز مكشاف كهربائي مشحون مسبقاً أن يستخدم لتحديد نوع شحنة جسم مشحون.



16-5 قانون كولوم

لقد رأينا أنّ الشحنة الكهربائية تؤثّر في قوّة تجاذب أو تنافر على الشحنات الكهربائية الأخرى. فما العوامل التي تؤثّر في قيمة هذه القوة؟ ولإيجاد الحلّ المناسب على هذا التساؤل؛ قام العالم الفرنسي كولوم (1736 – 1806) بالتحري عن القوى الكهربائية في ثمانينيات القرن الثامن عشر باستخدام الميزان الالتوائي (شكل 16 – 13). كالذي استخدمه كافندش تماماً، خلال دراسته لقوة الجاذبية (الفصل الخامس).

إنّ الأجهزة الدقيقة لم تكن متوافرة لقياس الشحنات الكهربائية في الفترة الزمنية التي عاشها كولوم، ومع هذا فقد كان قادرًا على تحضير كرات صغيرة ذات كميات مختلفة من الشحنات، وعلى تحديد النسب بينها.* وعلى الرغم من مواجهته لبعض الصعوبات في التعامل مع الشحنات المستحثة، إلا أنه كان قادرًا على مناقشة أنّ القوة التي يؤثر بها جسم صغير مشحون في جسم صغير آخر مشحون تتناسب طرديًّا مع الشحنة على كل منهما. أي أنّه لو تضاعفت الشحنة على أيٍّ من الجسمين، فإن القوة ستتضاعف؛ كما لو أنّ الشحنة تضاعفت على كلا الجسمين، فإنّ القوة ستزداد إلى أربعة أضعاف قيمتها الأصلية. وهذه هي الحالة عندما تبقى المسافة الفاصلة بين الشحنتين ثابتة. ووجد كولوم أنه إذا سمح للمسافة الفاصلة بين الشحنتين بالإزدياد، فإن القوة ستتناقص مع مربع المسافة بين الشحنتين؛ أيّ لو أن المسافة تضاعفت، فإن القوة ستنخفض إلى ربع قيمتها الأصلية. وبناءً عليه استنتج كولوم أن القوة التي يؤثر بها جسم صغير مشحون في جسم آخر مشحون تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب قيمة الشحنة على أحدهما Q_1 في قيمة الشحنة على الآخر Q_2 وعكسيًّا مع مربع المسافة r الفاصلة بينهما (الشكل 16 – 14). وكمعادلة، يمكننا كتابة **قانون كولوم** كالتالي:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

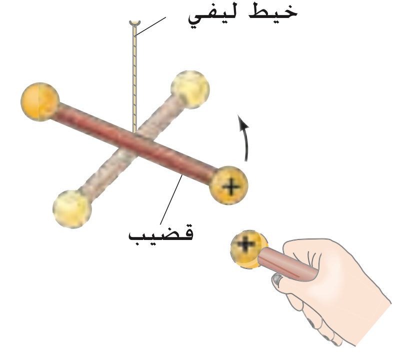
(1 – 16) [القيم]

وتمثل k ثابت التناسب.**

ويعطي قانون كولوم (المعادلة 16 – 1) قيمة القوة الكهربائية التي يؤثر بها أيّ من الجسمين في الآخر. ويكون اتجاه القوة الكهربائية دائماً على امتداد الخط الواصل بين الجسمين. وإذا كان للشحنتين الإشارة نفسها، فإن القوة على كل منهما ستتجه مبتعدة عن الأخرى (تتنافر). وأما إذا كانت الشحنتان مختلفتين في الإشارة، فإن القوة على إحداهما ستتجه نحو الأخرى (ستتجاذبان). انظر (الشكل 16 – 15). لاحظ أن القوة التي تؤثر بها إحدى الشحنتين في الأخرى تعادل بالمقدار وتعاكس بالاتجاه القوة التي تؤثر بها الثانية في الأولى حسب قانون نيوتن الثالث.

* جادل كولوم أنه عند ملامسة كرة موصلة مشحونة لكرة مماثلة غير مشحونة، فإن الشحنة على الأولى ستتوزع بالتساوي على الكرتين بسبب تماثلهما. وهكذا وجد كولوم طريقة للحصول على شحنات مساوية لـ $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{4}$، وهكذا دواليك، من قيمة الشحنة الأصلية.

** وتعتمد صلاحية قانون كولوم في أيامنا هذه على القياسات الدقيقة والأكثر دقة بكثير من التجربة الأصلية التي قام بها. وأُثبت حالياً أنّ الأسّ 2 في قانونه دقيقٌ لدرجة جزء واحد لكل 10^{16} [أيّ أنه $2 \pm (1 \times 10^{-16})$].

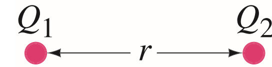


الشكل 16 – 13 مبدأ عمل آلة كولوم. تشبه هذه الآلةُ آلةَ كافندش التي استخدمت لقوة الجاذبية. وعندما تُقرب كرة خارجية مشحونة من الكرة المشحونة الأخرى الموجودة على العمود المعلق يبدأ العمود بالدوران الخفيف ويمانع الخيط الليفي الرفيع حركة الدوران هذه لتتناسب زاوية اللي مع القوة المؤثرة. وبحث كولوم كيفية تغير القوة الكهربائية بدلالة قيمة الشحنات والمسافة الفاصلة بينهما.

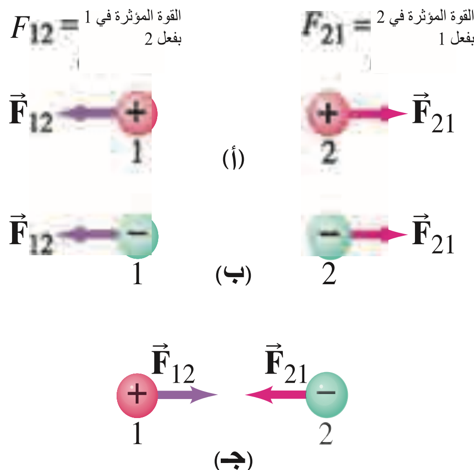
قانون كولوم

اتجاه القوة

الشكل 16 – 14 يعطي قانون كولوم (المعادلة 16 - 1) القوة بين شحنتين Q_1 و Q_2 تفصل بينهما مسافة r.



الشكل 16 – 15 يعتمد اتجاه القوة على ما إذا كانت إشارة الشحنات متماثلة كما في (أ) و(ب) أو مختلفة كما في (جـ).



وحدة الشحنة: الكولوم

الوحدة الدولية للشحنة هي **الكولوم** (C).* ويُعطى التعريف الدقيق في الوقت الحاضر للكولوم بدلالة كلّ من التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي. وهذا ما سنناقشه لاحقا (البند 20 – 6). وتُعطى قيمة k حسب النظام الدولي (SI) كالتالي:

$$k = 8.988 \times 10^{9}\, \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$$

أو عندما نحتاج إلى رقمين مميزين فقط:

$$k \approx 9.0 \times 10^{9}\, \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$$

وعليه، فإنّ 1 C هي كمية الشحنة التي إنّ وضعت على جسمين نقطيين تفصلهما مسافة 1.0 m ستنتج قوة يؤثر بها كل جسم في الآخر مقدارها $(9.0 \times 10^9\, \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(1.0\, \mathrm{C})(1.0\, \mathrm{C})/(1.0\, \mathrm{m})^2 = 9.0 \times 10^9\, \mathrm{N}$ وهو مقدار هائل جدًّا من القوة يساوي وزناً يقارب المليون طن. ولا تُصادف غالبًا شحنات كبيرة بقدر الكولوم. وعادة ما تكون الشحنات المتولدة نتيجة الدلك الاعتيادي للأجسام (مثل المشط والمسطرة البلاستيكية) حوالي مايكروكولوم واحد $(1\, \mu\mathrm{C} = 10^{-6}\, \mathrm{C})$ أو أقلّ. والأجسام التي تحمل شحنة موجبة لديها عجز في الإلكترونات، أمّا الأجسام المشحونة بشحنة سالبة فيكون لديها فائض في عدد الإلكترونات. وتم تحديد الشحنة على إلكترون واحد لتعادل حوالي $1.602 \times 10^{-19}\, \mathrm{C}$. وهي أصغر شحنة حُرَّة موجودة في الطبيعة.** وتمّ إعطاؤها الرمز e لأنها أساسية، ويشار إليها عادة بالشحنة الأولية:

الشحنة على الإلكترون (الشحنة الأولية)

$$e = 1.602 \times 10^{-19}\, \mathrm{C}$$

لاحظ أنّ e تم تعريفها كرقم موجب. وعليه، فإنّ الشحنة الإلكترونية هي $-e$. (وأمّا الشحنة على البروتون من ناحية أخرى فهي $+e$). وبما أنّ الجسم غير قادر على اكتساب جزء من الإلكترون أو فقدانه، فإن الشحنة الصافية على أي جسم يجب أن تكون مضاعفات هذه الشحنة. ويقال عندئذٍ بأنّ الشحنة **مكميّة** (توجد فقط بمضاعفات محددة: $1e$ أو $2e$ أو $3e$، إلى آخره). ونتيجة لصغر e المتناهي، فإننا لا نلاحظ هذا التحديد على الشحنات الجاهرية (يتطلب 1μ C حوالي 10^{13} إلكترون) التي تظهر مستمرة.

الشحنة الكهربائية مكماة

قانون كولوم وقانون الجذب الكوني

ويبدو قانون كولوم مشابهًا كثيرًا لقانون الجذب الكوني $F = G\, m_1 m_2/r^2$ الذي يعبر عن قوة الجاذبية التي تؤثر بها كتلة m_1 في كتلة أخرى m_2 (المعادلة 5 – 4). وكلاهما يمثّل قانون تربيع عكسي $(F \propto 1/r^2)$. كما أنّ كلاهما يتناسب مع صفة لكل جسم؛ الكتلة للجاذبية والشحنة الكهربائية للكهرباء. وكلاهما يؤثر عن بعد (أي أنّه لا حاجة إلى التلامس). والفرق الرئيس بين القانونين هو أن الجاذبية دائمًا قوة جذب، ولكن القوة الكهربائية يمكن لها أن تكون قوة تجاذب أو قوة تنافر. وتأتي الشحنات الكهربائية على نوعين؛ موجبة وسالبة. أمّا كتلة الجاذبية فهي دائمًا موجبة. وعادة ما يكتب الثابت k في (المعادلة 16 – 1) بدلالة ثابت آخر ϵ_0 يسمى **سماحية الفراغ**. وعلاقته مع k هي $k = 1/4\pi\epsilon_0$. ويمكن كتابة قانون كولوم كالتالي:

قانون كولوم (بدلالة ϵ_0)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad \textbf{(2 – 16)}$$

حيث:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12}\, \mathrm{C^2/N \cdot m^2}$$

وتبدو (المعادلة 16 – 2) أكثر تعقيداً من (المعادلة 16 – 1). ومع هذا، فهناك معادلات أساسية أخرى لم نرها بعد إلى الآن تبدو أبسط بدلالة ϵ_0 مقارنة مع k. وليس مهمًّا أيّ شكل سنستخدم طالما أن (المعادلتين 16 – 1 و 16 – 2) متكافئتان. (أحدث وأدق قيمتين لكل من e و ϵ_0 موجودتان داخل الغلاف الأمامي لهذا الكتاب).

كتابة الوحدات

[وبتعريفنا للوحدات مثل $\mathrm{C^2/N \cdot m^2}$ للثابت ϵ_0 فإنّنا نعني أن $\mathrm{m^2}$ هي بالمقام. أي أنّ $\mathrm{C^2/N \cdot m^2}$ لا تعني $(\mathrm{C^2/N}) \cdot \mathrm{m^2} = \mathrm{C^2 \cdot m^2/N}$ (ولو كان هذا صحيحاً لكتبناها بهذه الطريقة)].

* حسب نظام الوحدات السغثية cgs (سم، غم، ث) الذي كان متداولاً في السابق، فإنّ قيمة k كانت تساوي 1. وكانت وحدة الشحنات الكهربائية تدعى وحدة الكهرباء الساكنة (esu) أو الكولوم الساكنة (stat coulomb). وتم تعريف 1 esu بالشحنة الموجودة على جسمين نقطيين يفصل بينهما 1سم، ويسببان قوة مقدارها 1 dyne.

** حسب النموذج الاعتيادي لفيزياء الأجسام الأولية، فإنّ هناك جسيمات تدخل في تركيب الجسيمات المكونة للنواة وتدعى الكواركات (Quarks أو Quorks، الفصل الثاني والثلاثين) وتتميز بشحنة أصغر من شحنة الإلكترون تعادل $\frac{1}{3}e$ أو $\frac{2}{3}e$. ولم يتمّ قياس الكواركات إلى الآن كأجسام معزولة. وتشير النظرية إلى أنه قد يكون من غير الممكن قياس كواركات حرة.

شحنة نقطية

تطبق (المعادلتان $16-1$ و $16-2$) على الأجسام ذات الأحجام الصغيرة جدًّا مقارنة مع المسافة الفاصلة بينها. والقانون دقيق **للشحنات النقطية** (التي يمكن إهمال أبعادها بالنسبة إلى المسافات الأخرى). أمّا بالنسبة إلى الأجسام ذات الأبعاد أو الأحجام الملموسة، فإنّه ليس واضحًا أيّ قيمة لـ r يمكن استخدامها، وخصوصًا لأنّ توزيع الشحنات على الجسم قد لا يكون منتظمًا . وإذا كان الجسمان كرتين، وكان معلومًا أنّ توزيع الشحنات على كلٍّ منهما منتظم فإنّ r هي المسافة الفاصلة بين مركزيهما.

ويصف قانون كولوم القوة بين شحنتين ساكنتين. وهناك قوى أخرى تظهر عندما تكون الشحنات متحركة. وهذا ما سنناقشه في الفصول اللاحقة. ولكن سنناقش في هذا الفصل الشحنات الساكنة فقط، التي يطلق عليها علم **الكهرباء الساكنة** (الكهروسكونية).

وعند حساب قانون كولوم، غالباً ما نهمل إشارات الشحنات، ونحدد اتجاه القوة بطريقة مستقلة معتمدين على ما إذا كانت القوة ناتجة من التجاذب أم التنافر.

توجيه لحلّ الأسئلة.

استعمل قيم في قانون كولوم. وحدّد اتجاه القوة من اشارات الشحنات.

المثال 16-1 **القوة الكهربائية على الإلكترون بواسطة البروتون.**

حدد قيمة القوة الكهربائية التي يؤثر بها البروتون الوحيد لذرة هيدروجين $(Q_2 = +e)$ أي نواة الذرة في إلكترونها الوحيد، وحدّد اتجاهها كذلك. افترض أنّ متوسط المسافة الفاصلة بين الإلكترون الدوار والبروتون هو $r = 0.53 \times 10^{-10}\,\text{m}$ (شكل $16-16$).

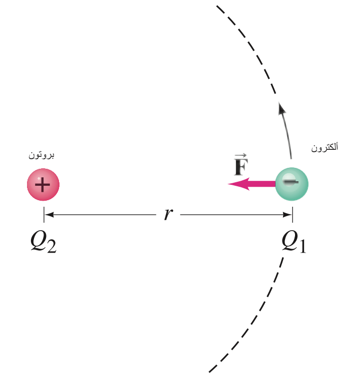
النهج: نستخدم قانون كولوم $F = kQ_1Q_2/r^2$ (معادلة $16-1$) لإيجاد قيمة القوة علماً بأن $r = 0.53 \times 10^{-10}\,\text{m}$. ويمتلك الإلكترون والبروتون مقدار الشحنة e نفسه، حيث $Q_1 = Q_2 = 1.6 \times 10^{-19}\,\text{C}$.

الحل: تعطى قيمة القوة كالتالي :

$$F = k\frac{Q_1Q_2}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})}{(0.53 \times 10^{-10}\,\text{m})^2}$$

$$= 8.2 \times 10^{-8}\,\text{N}.$$

واتجاه القوة على الإلكترون هو نحو البروتون؛ لأنّ للشحنتين إشارتين مختلفتين، والقوّة هي قوّة تجاذب.



الشكل 16 – 16 (مثال 16 - 1)

المثال المفاهيمي 16-2 **ما هي الشحنة التي تؤثر بقوة أكبر**

تفصل مسافة l بين شحنتين نقطيتين موجبتين $Q_1 = 50\,\mu\text{C}$ و $Q_2 = 1\,\mu\text{C}$ (شكل $16-17$). ما هي القوة الأكبر: القوة التي تؤثر بها Q_1 في Q_2 أم القوة التي تؤثّر بها Q_2 في Q_1؟

الإجابة: من قانون كولوم، القوّة التي تؤثّر بها Q_2 في Q_1 هي:

$$F_{12} = k\frac{Q_1Q_2}{l^2}$$

والقوّة التي تؤثّر بها Q_1 في Q_2 هي:

$$F_{21} = k\frac{Q_2Q_1}{l^2}$$

وهي نفس قيمة سابقتها تمامًا. وبما أنّ المعادلة متماثلة بالنسبة إلى الشحنتين، فإن $F_{21} = F_{12}$. ويخبرنا كذلك قانون نيوتن الثالث بأن لهاتين القوتين القيمة نفسها.

الشكل 16 – 17 (مثال 16 - 2)

$Q_1 = 50\,\mu\text{C}$ $\quad l \quad$ $Q_2 = 1\,\mu\text{C}$

التمرين أ: في (المثال $16-2$)، كيف يرتبط اتجاه F_{12} مع اتجاه F_{21}؟

التمرين ب: ما قيمة F_{12} (و F_{21}) في (المثال $16-2$) إذا كان $l = 30\,\text{cm}$؟

من الجدير بالاهتمام أن نتذكر دائمًا بأنّ قانون كولوم (معادلة 16 – 1 أو 16 – 2) يعطي القوّة على شحنة ما الناتجة من شحنة أخرى. أما إذا وُجدت أكثر من شحنة (أو عدة شحنات). فإنّ القوّة المحصلة على أيٍّ منها ستكون المحصلة المتجهة للقوة المؤثرة في هذه الشحنة من قِبل الشحنات الأخرى. ويعتمد **مبدأ التراكب (الجمع الموضعي)** هذا على التجارب. ويخبرنا أن متجهات القوى الكهربائية تجمع كما تجمع أي متجهات أخرى. وعلى سبيل المثال. فإن القوة المحصلة على الشحنة 1 في نظام يتكون من أربع شحنات هي مجموع القوى المؤثرة في الشحنة 1 من قِبل الشحنات 2 و 3 و 4. وتحدد قيمة هذه القوى الثلاث من قانون كولوم. ومن ثم يتم جمعها اتجاهياً.

مبدأ التراكب (الجمع الموضعي): تجمع القوى الكهربائية كمتجهات.

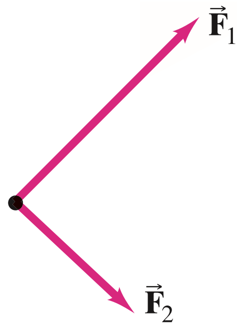
6-16 حل مسائل تتضمن قانون كولوم والمتجهات

تعدّ القوةُ الكهربائية بين الأجسام المشحونة الساكنة (يشار إليها في بعض الأحيان بأنّها **القوّة الكهربائية الساكنة** أو **قوة كولوم**) متجهاً كالقوى الأخرى؛ أيْ أن لها قيمة واتجاه. وعندما تعمل عدّة قوى على جسم ما (ولنسمها $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$، الخ) فإنّ القوة المحصلة $\vec{F}_{net}$ على هذا الجسم هي الجمع الاتجاهي لهذه القوى المؤثرة فيه:

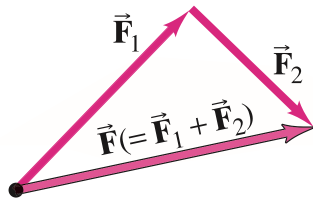
$$\vec{F}_{net} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots$$

وكما رأينا. فهذا هو مبدأ الجمع الموضعي للقوى. وقد درسنا في الفصل الثالث كيفية جمع المتجهات. في حين استخدمنا في الفصل الرابع القوانين لجمع المتجهات للحصول على القوة المحصّلة المؤثرة في الجسم عند جمع متجهات القوى المختلفة المؤثرة فيه. لذا. من المناسب الآن استعراض (البنود 3 – 2، و3 – 3، و3 – 4). بالإضافة إلى (البند 4 – 9) والتي تتضمن طرقًا عامة لحل المسائل. وإليك الآن نظرة عامة ومختصرة للمتجهات.

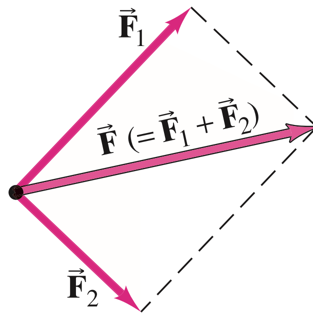
الشكل 16 – 18 مراجعة عامة لجمع المتجهات.



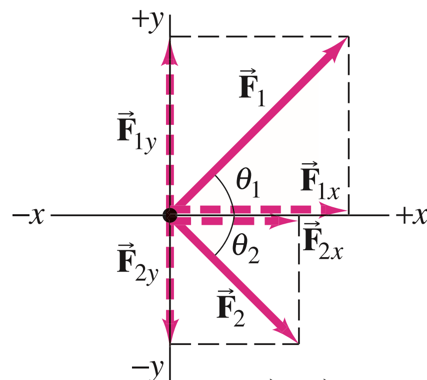
(أ) قوتان تؤثران في الجسم نفسه.



(ب) القوة الكلية أو المحصلة $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ من الذيل الى الرأس



(جـ) $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ بطريقة اكمال متوازي الأضلاع



(د) بتحليل $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ الى مراكباتها السينية x و الصادية y

مراجعة عامة لجمع المتجهات

افرض أنّ هناك قوتين متجهتين $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ تؤثران في جسم ما (شكل 16– 18أ). يمكن جمعهما باستخدام طريقة الذيل والرأس (شكل 16 – 18 ب). أو باستخدام طريقة متوازي المستطيلات (شكل 16 – 18 جـ) كما تمت مناقشتها في (البند 3 – 2). تعدّ هاتان الطريقتان ضروريتين لفهم مسألة ما (للحصول على صورة ذهنية لما يحدث). ومع هذا. فإن طريقة الجمع باستخدام المركبات أكثر دقة من سابقتيها لتحديد الاتجاه وحساب قيمة محصّلة الجمع. ويظهر (الشكل 16– 18 د) القوتين $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ محللتين إلى مركبتيهما على امتداد المحورين السيني (x) والصادي (y) المختارين (انظر البند 3 – 4 لتفصيل أكثر). ومن تعريفات الدوال المثلثية (الشكلان 3 – 11 و 3 – 12) نحصل على:

$$F_{1x} = F_1\cos\theta_1 \qquad F_{2x} = F_2\cos\theta_2$$
$$F_{1y} = F_1\sin\theta_1 \qquad F_{2y} = -F_2\sin\theta_2$$

ونجمع المركبتين السينية والصادية:

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1\cos\theta_1 + F_2\cos\theta_2$$
$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1\sin\theta_1 - F_2\sin\theta_2$$

وقيمة القوة المحصلة $\vec{F}$ هي:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

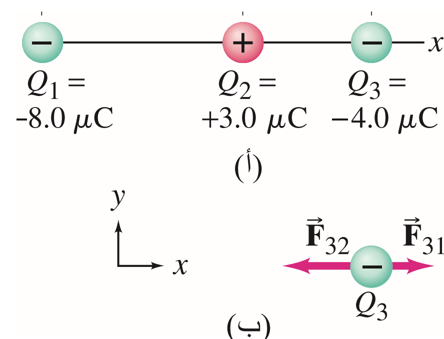
ويحدد اتجاه $\vec{F}$ بواسطة الزاوية θ التي تصنعها $\vec{F}$ مع المحور السيني x كالتالي:

$$\tan\theta = \frac{F_y}{F_x}$$

جمع القوى الكهربائية ومبدأ التراكب (الجمع الموضعي)

عند التعامل مع عدّة شحنات، فإنّ استخدام رموز سفلية زوجية لتصاحب القوى ذات العلاقة جميعها يعدّ من الأمور المساعدة. ويشير الرمز السفلي الأول إلى الجسم الذي تؤثر فيه القوّة. أمّا الرمز السفلي الثاني فيشير إلى الجسم الذي يسبب القوة. وعلى سبيل المثال، إذا كان النظام مكوناً من ثلاث شحنات، فإن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ تعني القوّة التي يُؤثّر بها الجسم الأول في الجسم الثالث.

وكما هو في حلول المسائل جميعها، فإنّه من المهمّ جدًّا أن ترسم مخططًا، وتحديدًا مخطط جسم – حر (الفصل 4) لكل جسم وإظهار القوى المؤثرة على الجسم جميعها. وعند تطبيق قانون كولوم، نستطيع التعامل مع مقادير الشحنات فقط (تاركين الإشارات السالبة) للحصول على قيمة كل قوة. ثُمّ نحدد اتجاه القوة بصورة منفصلة (على امتداد الخط الفاصل بين الجسمين: تتنافر الشحنات المتماثلة وتتجاذب الشحنات المختلفة) ومن ثَمّ نظهر هذه القوة على المخطط. وفي النهاية نجمع كلّ هذه القوى المؤثرة في الجسم كمتجهات للحصول على محصلة القوى المؤثرة فيه.



الشكل 16 – 19 (المثال 16 - 13)

المثال 16-3 ثلاث شحنات على استقامة واحدة.

رتبت ثلاث شحنات في خط كما هو مبين في (الشكل 16 – 19 أ). احسب محصلة القوة الكهربائية الساكنة على الجسم 3 (شحنته $-4.0\ \mu C$ على اليمين) الناتجة من تأثير الشحنتين الباقيتين.

النهج: محصلة القوة على الجسم 3 هي الجمع الاتجاهي للقوّة $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ المؤثرة في 3 بواسطة 1، والقوة $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ المؤثرة في 3 بواسطة 2: $\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_{31} + \vec{\mathbf{F}}_{32}$.

الحل : يمكن الحصول على قيمة هاتين القوتين باستخدام قانون كولوم حسب (المعادلة 16 – 1):

$$F_{31} = k\frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})(8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.50\,\mathrm{m})^2} = 1.2\,\mathrm{N}$$

حيث $r_{31} = 0.50\ \mathrm{m}$ وهي المسافة من Q_3 إلى Q_1. وبالمثل:

$$F_{32} = k\frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})(3.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.20\,\mathrm{m})^2} = 2.7\,\mathrm{N}$$

وبما أنّنا كنا نحسب قيم القوى، فقد أهملنا إشارات الشحنات. ومع هذا، يجب أن تبقى الإشارات في أذهاننا لكي نحدد اتجاه كلّ قوّة. ولندع الخط الذي يجمع هذه الأجسام المحور السيني (x) واتجاهه الموجب إلى اليمين. وبما أن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ هي قوة تنافر، في حين $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ هي قوة تجاذب واتجاههما مبين في (الشكل 16 – 19 ب)، فإنّ F_{31} تشير إلى الاتجاه الموجب للمحور السيني (x) أمّا F_{32} فتشير إلى الاتجاه السالب للمحور السيني (x). وتصبح محصلة القوتين على الجسم 3 كالتالي:

$$F = -F_{32} + F_{31} = -2.7\,\mathrm{N} + 1.2\,\mathrm{N} = -1.5\,\mathrm{N}$$

أي أن قيمة القوة المحصلة هي $1.5\ \mathrm{N}$ وتشير إلى اليسار.

ملحوظة : تؤثر الشحنة Q_1 في الشحنة Q_3 كما لو أنّ الشحنة Q_2 غير موجودة في موضعها (وهذا هو مبدأ التراكب). أي أن الشحنة Q_2 في المنتصف لا تحجب تأثير الشحنة Q_1 عن Q_3. ومن الطبيعي أن تؤثر Q_2 بقوتها الخاصة في Q_3.

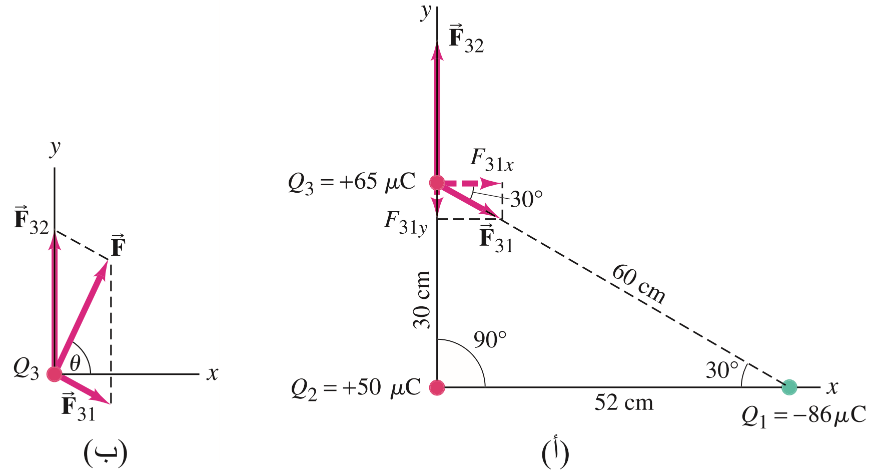
! تنويه:
تؤثر كل شحنة بقوتها الخاصة، ولا تحجب أي شحنة تأثير الشحنات الأخرى.

التمرين جـ: حدد القوة المحصلة على Q_1 في (الشكل 16 – 19 أ).

المثال 16-4 القوة الكهربائية باستخدام المركبات.

احسب محصلة القوى الكهربائية الساكنة على الشحنة Q_3 المبينة في (الشكل 16 – 20 أ) الناتجة من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج: نستخدم قانون كولوم لإيجاد قيم القوى كلًّا على حدة. ويكون اتجاه كلّ قوة على امتداد الخط الواصل بين Q_3 إلى Q_1 أو إلى Q_2. واتجاه كل من القوتين $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ مبين كما في (الشكل 16 – 20 أ)؛ لأنّ Q_1 تؤثر بقوة تجاذب في Q_3، في حين تؤثر Q_2 بقوة تنافر. وبما أن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ لا تقعان على الخط نفسه، فيجب علينا أن نحلّل كلًّا منهما ($\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$) إلى مركبتين على امتداد المحورين x و y ومن ثمّ نطبق الجمع الاتجاهي للحصول على القوة الناتجة على Q_3.



الشكل 16 – 20 تحديد القوى في (المثال 16 - 4). (أ) اتجاهات القوى المنفردة كما هي مبينة لأن $\vec{F}_{32}$ هي قوة تنافر (القوة على Q_3 هي باتجاه يبتعد عن Q_2 لأن كلاً من Q_2 وQ_3 موجب) أمّا $\vec{F}_{31}$ فهي قوة تجاذب (إشارة كلّ من Q_3 و Q_1 متعاكسة) وتشير $\vec{F}_{31}$ باتجاه Q_1. (ب) جمع $\vec{F}_{32}$ إلى $\vec{F}_{31}$ للحصول على القوة المحصلة $\vec{F}$

الحل: تُحسب قيمتا $\vec{F}_{31}$ و $\vec{F}_{32}$ (مع إهمال إشارات الشحنات بعد معرفة الاتجاهات) كالتالي:

$$F_{31} = k\frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} = \frac{(9.0\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(6.5\times10^{-5}\,\mathrm{C})(8.6\times10^{-5}\,\mathrm{C})}{(0.60\,\mathrm{m})^2} = 140\,\mathrm{N},$$

$$F_{32} = k\frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = \frac{(9.0\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(6.5\times10^{-5}\,\mathrm{C})(5.0\times10^{-5}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2} = 330\,\mathrm{N}.$$

ونحلّل $\vec{F}_{31}$ إلى مركبتيها على امتداد المحورين السيني (x) والصادي (y) كما هو مبيّن في (الشكل 16 – 20 أ):

$$F_{31x} = F_{31}\cos 30° = (140\,\mathrm{N})\cos 30° = 120\,\mathrm{N},$$
$$F_{31y} = -F_{31}\sin 30° = -(140\,\mathrm{N})\sin 30° = -70\,\mathrm{N}.$$

أمّا القوّة $\vec{F}_{32}$، فإنّ لها مركبة صادية (y) فقط. لذا، فإنّ مركبتي محصلة القوى $\vec{F}$ المؤثرة في Q_3 تعطى كالتالي:

$$F_x = F_{31x} = 120\,\mathrm{N},$$
$$F_y = F_{32} + F_{31y} = 330\,\mathrm{N} - 70\,\mathrm{N} = 260\,\mathrm{N}.$$

وقيمة محصلة القوى هي:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(120\,\mathrm{N})^2 + (260\,\mathrm{N})^2} = 290\,\mathrm{N};$$

وتوتر بزاوية θ تعطى كالتالي (انظر الشكل 16 – 20 ب):

$$\tan\theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{260\,\mathrm{N}}{120\,\mathrm{N}} = 2.2,$$

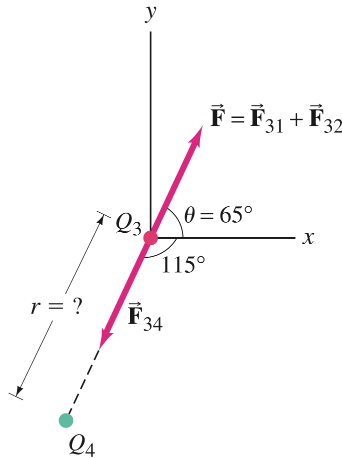
أي أن: $\theta = \tan^{-1}(2.2) = 65°$.

ملحوظة: لأنّ $\vec{F}_{31}$ و $\vec{F}_{32}$ ليستا على امتداد الخط نفسه، فإن قيمة $\vec{F}_3$ لا تساوي المجموع (أو الفرق كما في المثال 16 – 3) للقيم المنفردة. أي أن F_3 لا تساوي $F_{31} + F_{32}$. كما أنها لا تساوي $F_{32} - F_{31}$ وبدلًا من ذلك كان علينا أن نجمع اتجاهياً.

المثال المفاهيمي 16-5 **اجعل القوة على Q_3 صفرًا.**

أين يمكن لك وضع شحنة رابعة $Q_4 = -50\,\mu C$ بحيث تكون القوة المحصلة على Q_3 صفرًا؟

الإجابة: حسب مبدأ التراكب، فإنّنا بحاجة إلى قوة في الاتجاه المعاكس تمامًا للمحصلة $\vec{F}$ الناتجة من تأثير Q_2 وQ_1 التي حسبناها في (المثال 16 – 4) (شكل 16 – 20 ب). ويجب أن تكون قيمة القوة $290\ \mathrm{N}$، كما يجب أن تشير إلى الأسفل وعلى يسار Q_3 في (الشكل 16 – 20 ب). وعليه، فإنّ Q_4 يجب أن تكون على امتداد هذا الخط. انظر (الشكل 16 – 21).



الشكل 16 – 21 (مثال 16 - 5) وتمرين د: تؤثر Q_4 بقوة ($\vec{F}_{34}$) تجعل محصلة القوى على Q_3 صفرًا.

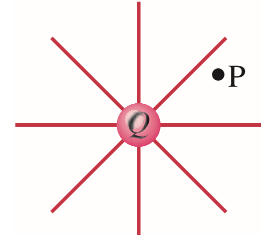
التمرين د: ما المسافة r التي يجب أن تفصل بين Q_4 و Q_3 في (المثال 16 – 5)؟

التمرين هـ: (أ) خذ شحنتين نقطيتين لهما القيمة نفسها، وإشارتاهما مختلفتان ($+Q$ و$-Q$) وتبتعدان مسافة ثابتة d عن بعضهما بعضًا. هل تستطيع إيجاد موقع تضع فيه شحنة موجبة ثالثة Q بحيث تكون محصلة القوى الكهربائية عليها مساوية للصفر؟ (ب) ماذا لو أنّ الشحنتين الأوليتين كانتا كلتاهما $+Q$ (موجبتين)؟

7-16 المجال الكهربائي

يُشار إلى كثيرٍ من القوى العامة "بقوى التلامس" ومثال ذلك دفع يديك عربة مشتريات أو سحبها، أو عندما يضرب مضرب التنس كرة التنس.

وعلى النقيض من ذلك، فإنّ كلاً من قوّة الجاذبيّة والقوّة الكهربائية تؤثران عن بعد؛ أي أنّ هناك قوة بين جسمين بالرغم من عدم ملامسة بعضهما بعضًا. وكانت فكرة القوة التي تعمل عن بعد فكرة صعبة القبول للمفكرين الأوائل. وشعر نيوتن بعدم الراحة في التعامل مع هذه الفكرة عندما نشر قانونه في الجاذبية الكونية. وكطريقة مساعدة للنظر إلى هذه الحالة؛ تستخدم فكرة **المجال** التي طورها العالم البريطاني مايكل فارادي (1791 – 1867). وبحسب فارادي في حالة الكهرباء، فإن المجال الكهربائي يمتد نحو الخارج من كل شحنة ليتخلل الفضاء كله (شكل 16 – 22). وإذا وضعت شحنة ثانية (سمّها Q_2) بالقرب من الشحنة الأولى فإنّها ستشعر بقوّةٍ يؤثّر بها المجال الكهربائي في ذلك الموضع ولنقل عند النقطة P في (الشكل 16 – 22) . وافترض أن المجال الكهربائي عند النقطة P يتفاعل مباشرةً مع الشحنة Q_2 لينتج القوة على Q_2.

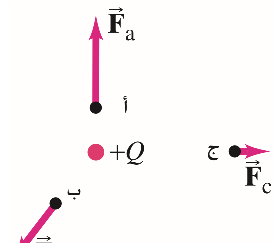


الشكل 16 – 22 يحيط المجال الكهربائي بكل نقطة. P هي نقطة اعتباطية.

ويمكن لنا من ناحية المبدأ أن ندرس المجال الكهربائي المحيط بشحنة أو بمجموعة من الشحنات عن طريق قياس القوة المؤثرة في **شحنة اختبار** صغيرة وموجبة. ونعني بشحنة الاختبار أنها شحنة صغيرة لدرجة كافية كي تجعل القوة التي تؤثر فيها ضئيلة جداً لتعدل توزيع الشحنات الأخرى المولدة للمجال أو تغيرها. وإذا وضعت شحنة اختبار موجبة وضئيلة جداً عند مواضع مختلفة بالقرب من شحنة موجبة وحيدة Q كما هو مبين في (الشكل 16 – 23) (النقاط أ، ب، جـ)، فإن القوة التي تتأثر بها q تتجه قطريًا نحو الخارج من Q. ويُعرف المجال الكهربائي بدلالة القوة المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة هذه. وعلى وجه الخصوص، فإن **المجال الكهربائي** $\vec{\mathbf{E}}$ عند أي نقطة في الفضاء يعرف على أنه القوة $\vec{\mathbf{F}}$ المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة الضئيلة عند تلك النقطة مقسوماً على قيمة شحنة الاختبار q هذه :

شحنة اختبار

الشكل 16 – 23 القوة التي تؤثر بها $+Q$ في شحنة الاختبار الصغيرة q الموضوعة عند النقاط أ، ب، جـ.



تعريف المجال الكهربائي

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{q}. \qquad \mathbf{(3 - 16)}$$

وبالتحديد، فقد عرّفت $\vec{\mathbf{E}}$ على أنها نهاية $\vec{\mathbf{F}}/q$ عندما تصبح q أصغر وأصغر لتؤول إلى الصفر. أي أن q ضئيلة لدرجة أنها لا تؤثر بأيّ قوة على الشحنات الأخرى المكونة للمجال. ونستطيع أن نرى من هذا التعريف (معادلة 16– 3) أنّ المجال الكهربائي عند أي نقطة في الفضاء هو متجه له اتجاه القوة المؤثرة نفسه في شحنة الاختبار الموجبة الضئيلة عند تلك النقطة، والذي قيمته القوة لكل وحدة شحنات. وعليه، فإن وحدة $\vec{\mathbf{E}}$ الدولية (SI) هي النيوتن لكل كولوم (N/C).

$\vec{\mathbf{E}}$ كمتجه

والسبب في تعريف $\vec{\mathbf{E}}$ على أنها $\vec{\mathbf{F}}/q$ (مع $q \to 0$) هو لكي لا تعتمد على قيمة شحنة الاختبار q. وهذا يعني أنّ $\vec{\mathbf{E}}$ ستصف فقط تأثير الشحنات التي تصنع المجال الكهربائي عند تلك النقطة. ويمكن قياس المجال الكهربائي عند أي نقطة في الفضاء بناءً على هذا التعريف (معادلة 16 – 3) . ويمكن لنا حساب $\vec{\mathbf{E}}$ للحالات البسيطة المتضمنة شحنة واحدة أو عدة شحنات. وعلى سبيل المثال، فإن قيمة المجال الكهربائي على بعد r من شحنة نقطية وحيدة Q هي :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kqQ/r^2}{q}$$

المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية وحيدة.

$$E = k\frac{Q}{r^2} \qquad \text{[شحنة نقطية وحيدة]} \quad \mathbf{(16 - 4\ أ)}$$

أو بدلالة ϵ_0 كما في (المعادلة 16 – 2) ($k = 1/4\pi\epsilon_0$):

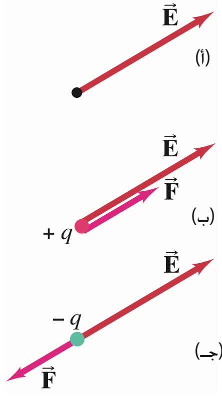
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}. \qquad \text{[شحنة نقطية وحيدة]} \quad \mathbf{(16 - 4\ ب)}$$

لاحظ أنّ E لا تعتمد على شحنة الاختبار q، بل إنّها تعتمد فقط على Q التي تولد المجال، وليس على قيمة شحنة الاختبار q. يشار إلى (المعادلتين 16 – 4) على أنهما نسخة المجال الكهربائي لقانون كولوم.

إذا أُعطينا المجال الكهربائي $\vec{E}$ عند نقطة ما في الفضاء، فإنّنا سنستطيع حساب القوة $\vec{F}$ المؤثرة في أي شحنة q موضوعة عند تلك النقطة عن طريق كتابة (انظر المعادلة رقم 16 – 3) :

$$\vec{F} = q\vec{E}. \qquad \textbf{(5 – 16)}$$

وهذا صحيح حتى عندما تكون q غير صغيرة طالما أن q لا تسبب تحرك الشحنات التي تولد $\vec{E}$. وإذا كانت q موجبة، فإن $\vec{F}$ و $\vec{E}$ سيشيران إلى الاتجاه نفسه. أما إذا كانت q سالبة، فإن كلاً من $\vec{F}$ و $\vec{E}$ سيشير إلى عكس اتجاه الآخر. انظر (الشكل 16 – 24).



الشكل 16 – 24 (أ) المجال الكهربائي عند نقطة معينة في الفضاء. (ب) القوة على شحنة موجبة عند تلك النقطة. (جـ) القوة على شحنة سالبة عند تلك النقطة.

المثال 16-6 آلة النسخ.

تعمل آلة النسخ عن طريق ترتيب الشحنات الموجبة (في النمط المراد نسخه) على سطح أسطوانة، ثم رش جزيئات الحبر الجاف المشحونة بشحنات سالبة بلطف على الأسطوانة. تلتصق جزيئات الحبر بشكل مؤقت على النمط المرتب على الأسطوانة (شكل 16 – 25) وتُنقل لاحقاً على ورقة و"تُذوّب" لتُنتج النسخة. ولنفترض أن كتلة كل جزيء حبر 9.0×10^{-16} kg، وأنّه يحمل بالمتوسط 20 إلكتروناً إضافياً لتزوده بشحنته السالبة. ولنفترض أنّ القوة الكهربائية على جزيء الحبر يجب أن تزيد بمرتين على قيمة وزنه لكي يُضمن مقدارٌ كافٍ من الجذب. احسب شدة المجال الكهربائي الضرورية قرب سطح الأسطوانة.

النهج: القوة الكهربائية على جزيء حبر شحنته $q = 20e$ هي $F = qE$ حيث إنّ E المجالُ الكهربائي الضروري. وتحتاج هذه القوة إلى أن تكون مساوية لضعفي وزن الجزي (mg) على الأقل.

الحل: القيمة الدنيا للمجال الكهربائي تحقق العلاقة :

$$qE = 2mg$$

حيث $q = 20e$. وعليه :

$$E = \frac{2mg}{q} = \frac{2(9.0 \times 10^{-16}\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)}{20(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})} = 5.5 \times 10^3\,\text{N/C}.$$

المثال 16-7 المجال الكهربائي لشحنة نقطية وحيدة.

احسب قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند النقطة P التي تقع على بعد 30 cm نحو يمين شحنة نقطية $Q = -3.0 \times 10^{-6}$ C.

النهج : تعطى قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة نقطية وحيدة (بالمعادلة 16 – 4). وتستخدم إشارة الشحنة Q لإيجاد الاتجاه.

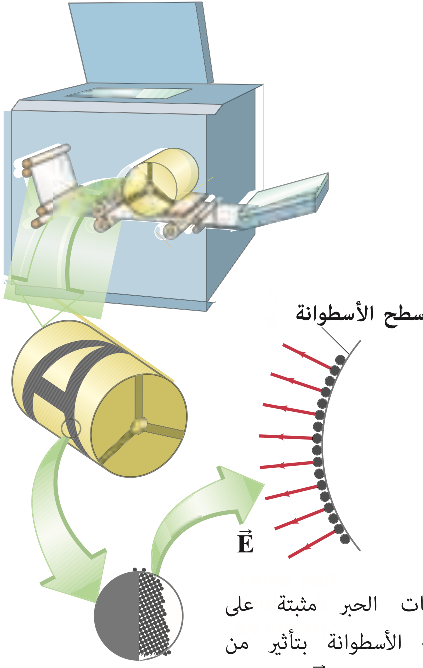
الحل : نحسب قيمة المجال الكهربائي:

$$E = k\frac{Q}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(3.0 \times 10^{-6}\,\text{C})}{(0.30\,\text{m})^2} = 3.0 \times 10^5\,\text{N/C}.$$

ويتجه المجال الكهربائي نحو الشحنة Q إلى اليسار كما هو مبين في (الشكل 16 – 26 أ). حيث عرّفنا الاتجاه على أنّه اتجاه القوة على شحنة اختبار موجبة وهي هنا قوة تجاذب. ولو كانت الشحنة Q موجبة، فإنّ المجال الكهربائي سيشير إلى الخارج مبتعداً كما هو في (الشكل 16 – 26 ب).

ملحوظة: لا توجد شحنة كهربائية عند النقطة P. ومع هذا، فهناك مجال كهربائي. والشحنة الحقيقية الوحيدة هي Q.

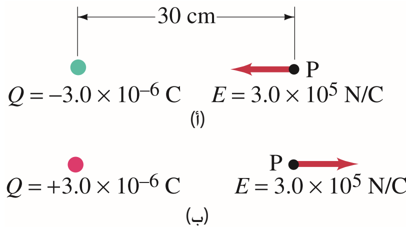
تطبيق الفيزياء
الناسخة الضوئية



جزيئات الحبر مثبتة على سطح الأسطوانة بتأثير من المجال الكهربائي $\vec{E}$

الشكل 16 – 25 (مثال 16 - 6).

الشكل 16 – 26 (مثال 16 - 7). المجال الكهربائي عند النقطة P (أ) الناتج من شحنة سالبة Q. (ب) الناتج من شحنة موجبة Q تبتعد كل منهما 30 cm عن P.



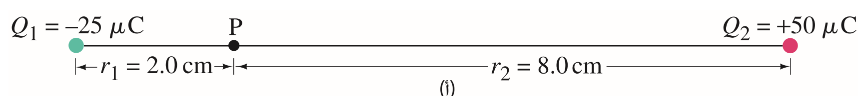
ويوضح هذا المثال نتيجة عامة: يشير المجال الكهربائي $\vec{E}$ الناتج من شحنات نقطية موجبة بعيدًا عنها، في حين يشير $\vec{E}$ الناتج من الشحنة النقطية السالبة باتجاه تلك الشحنة.

تمرين و: ما قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة $+2.5\,\mu$C واتجاهه عند نقطة 50 cm أسفل الشحنة؟

إذا كان المجال الكهربائي عند نقطة ما في الفضاء ناجما عن أكثر من شحنة، فإن المجالات المنفردة (سنسميها $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ ...إلخ) الناتجة من كل شحنة ستجمع اتجاهيًّا للحصول على المجال الكلي عند تلك النقطة: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots$.

مبدأ التراكب للمجالات الكهربائية.

ولقد تم إثبات صحة **مبدأ التراكب** للمجالات الكهربائية بالتجربة.





الشكل 16 – 27 (مثال 16 - 8). لا نعرف أطوال $\vec{\mathbf{E}}_1$ و$\vec{\mathbf{E}}_2$ النسبية في (ب) ما لم نجر الحسابات.

المثال 16-8 E عند نقطة بين شحنتين.

تبتعد شحنتان نقطيتان مسافة 10.0 cm عن بعضهما بعضًا. مقدار إحدى الشحنتين $-25\ \mu$C ومقدار الأخرى $+50\ \mu$C. (أ) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P بين الشحنتين والتي تبتعد مسافة 2.0 cm عن الشحنة السالبة (شكل 16 – 27 أ). (ب) إذا وُضِعَ إلكترونٌ (كتلته 9.11×10^{-31} kg) ساكنًا عند P، ثم تُرك حُرًّا، فما تسارعه الأولي (قيمة واتجاهًا)؟

النهج: المجال الكهربائي عند النقطة P هو الجمع الاتجاهي للمجالين المفردين الناجمين عن Q_1 و Q_2. ويشير المجال الناتج من الشحنة السالبة Q_1 باتجاه Q_1 . في حين يشير المجال الناتج من الشحنة الموجبة Q_2 بعيدًا عن Q_2. وعليه، فإن المجالين يتجهان إلى اليسار كما هو مبين في (الشكل 16 – 27 ب). ونستطيع أن نجمع قيمتي المجالين جبرياً مع بعضهما مع إهمال إشارتي الشحنتين. ونستعمل في (ب) قانون نيوتن الثاني $(F = ma)$ لتحديد التسارع حيث $F = qE$ (معادلة 16 – 5).

الحل: (أ) المجال الناتج من شحنة نقطية يُعطى (بالمعادلة 16 – 4). $E = kQ/r^2$. والمجال الكلي هو:

$$\begin{aligned} E &= k\frac{Q_1}{r_1^2} + k\frac{Q_2}{r_2^2} = k\left(\frac{Q_1}{r_1^2} + \frac{Q_2}{r_2^2}\right) \\ &= (9.0 \times 10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\left(\frac{25 \times 10^{-6}\,\text{C}}{(2.0 \times 10^{-2}\,\text{m})^2} + \frac{50 \times 10^{-6}\,\text{C}}{(8.0 \times 10^{-2}\,\text{m})^2}\right) \\ &= 6.3 \times 10^8\,\text{N/C}. \end{aligned}$$

(ب) يشير المجال الكهربائي إلى اليسار. وعليه، فسيشعر الإلكترون بقوة جذب نحو اليمين لأنّ شحنته سالبة. لذلك فإن التسارع $a = F/m$ (قانون نيوتن الثاني) سيكون إلى اليمين. والقوة على شحنة q في مجال كهربائي E هي : $F = qE$ (معادلة 16 – 5). إذن، قيمة التسارع الابتدائي للإلكترون هي:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{(1.60 \times 10^{-19}\,\text{C})(6.3 \times 10^8\,\text{N/C})}{9.11 \times 10^{-31}\,\text{kg}} = 1.1 \times 10^{20}\,\text{m/s}^2$$

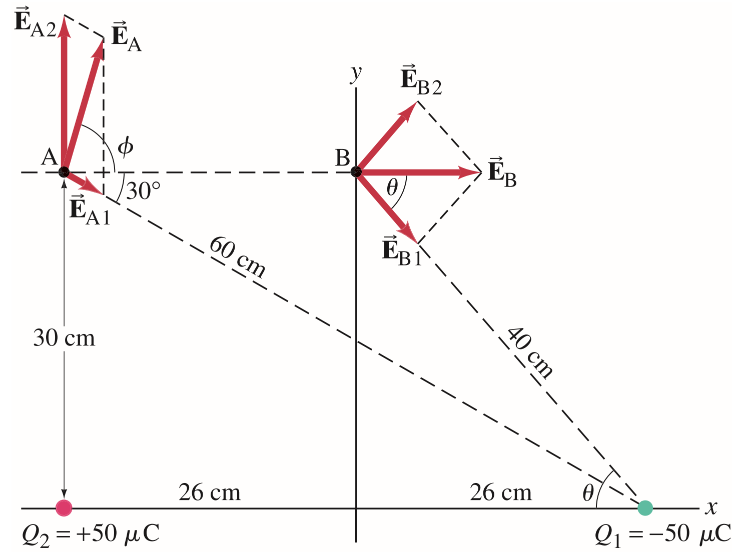
ملحوظة: من الممكن إجراء الحسابات بدقة وبطريقة صحيحة بعد التأكد من اتجاه كل مجال ($\vec{\mathbf{E}}_1$ و $\vec{\mathbf{E}}_2$) على حدة.

التمرين ز: حدد اتجاه كل مركبة من مركبات المجالين الكهربائيين $\vec{\mathbf{E}}_1$ و $\vec{\mathbf{E}}_2$، وكذلك المجال الكهربائي الكلي للموضعين بمعرفة الشحنتين المتشابهتين Q_1 و Q_2 كما في (الشكل 16 – 27): (أ) عند نقطة تميل قليلاً إلى يسار Q_1. (ب) عند نقطة تميل قليلاً إلى يمين Q_2. (تلميح : تذكر المعامل $1/r^2$).

المثال 16-9 E فوق شحنتين نقطيتين.

احسب المجال الكهربائي الكلي عند النقطة: (أ) A. (ب) B في (الشكل 16 – 28) الناتج من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج: إنّ طريقة الحساب تشبه الطريقة المستخدمة في (المثال 16 – 4) إلا أننا نتعامل هنا مع المجالات الكهربائية بدلاً من القوة. والمجال الكهربائي عند النقطة A هو الجمع المتجه للمجال $\vec{\mathbf{E}}_{A1}$ الناتج من Q_1، والمجال $\vec{\mathbf{E}}_{A2}$ الناتج من Q_2. ونجد قيمة المجال الناتج من الشحنتين النقطيتين. ثم نجمع مركباتهما للحصول على المجال الكلي عند النقطة A. و من ثمّ نكرر ذلك للنقطة B.



الشكل 16 – 28 حساب المجال الكهربائي عند النقطتين A و B (للمثال 16 - 9).

الحل: (أ) المجال الكهربائي المولد عند النقطة A الناجم عن الشحنتين Q_1 و Q_2 يُعطى بالمعادلة $E = kQ/r^2$. أي:

$$E_{A1} = \frac{(9.0 \times 10^9\,N\cdot m^2/C^2)(50 \times 10^{-6}\,C)}{(0.60\,m)^2} = 1.25 \times 10^6\,N/C,$$

$$E_{A2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,N\cdot m^2/C^2)(50 \times 10^{-6}\,C)}{(0.30\,m)^2} = 5.0 \times 10^6\,N/C.$$

ويشير اتجاه E_{A1} من A إلى Q_1 (شحنة سالبة). في حين تشير E_{A2} من A مبتعدة عن Q_2 كما هو مبين. أي أنّ مركبات المجال الكهربائي الكلي عند A، $\vec{E}_A$ هي:

$$E_{Ax} = E_{A1}\cos 30° = 1.1 \times 10^6\,N/C,$$

$$E_{Ay} = E_{A2} - E_{A1}\sin 30° = 4.4 \times 10^6\,N/C.$$

وأنّ قيمة $\vec{E}_A$ هي:

$$E_A = \sqrt{(1.1)^2 + (4.4)^2} \times 10^6\,N/C = 4.5 \times 10^6\,N/C,$$

ويعطى اتجاهه ϕ بواسطة $\tan\phi = E_{Ay}/E_{Ax} = 4.4/1.1 = 4.0$. وعليه. فإن $\phi = 76°$.

(ب) بما أنّ B على بعد متساوٍ من الشحنتين المتساويتين (40 cm حسب نظرية فيثاغورس) فإن قيمتي E_{B1} و E_{B2} متساويتان. أي أنّ:

$$E_{B1} = E_{B2} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,N\cdot m^2/C^2)(50 \times 10^{-6}\,C)}{(0.40\,m)^2}$$
$$= 2.8 \times 10^6\,N/C.$$

وأيضاً وبسبب التماثل. فإنّ المركبتين الصاديتين (y) متساويتان ومتعاكستان وتلغيان بعضهما. ويكون المجال الكلي E_B أفقيًّا ويساوي $E_{B1}\cos\theta + E_{B2}\cos\theta = 2E_{B1}\cos\theta$. ومن المخطط. فإنّ $\cos\theta = 26\,cm/40\,cm = 0.65$.

وعليه

$$E_B = 2E_{B1}\cos\theta = 2(2.8 \times 10^6\,N/C)(0.65)$$
$$= 3.6 \times 10^6\,N/C,$$

أمّا اتجاه $\vec{E}_B$ فهو على امتداد اتجاه $+x$.

ملحوظة: قد يحلّ الفرع (ب) بالطريقة نفسها المتبعة في الفرع (أ). ومع هذا. فإنّ التماثل سمح لنا بحل السؤال بطريقة أسهل وبجهود أقلّ.

توجيه لحلّ الأسئلة.
اهمل إشارتي الشحنتين، وحدد الاتجاه مباشرة مظهراً الاتجاهات على المخطط.

توجيه لحلّ الأسئلة.
استخدم التماثل لاختصار خطوات الحل متى أمكن ذلك.

طريقة حل المسائل	القوى الكهربائية والمجالات الكهربائية

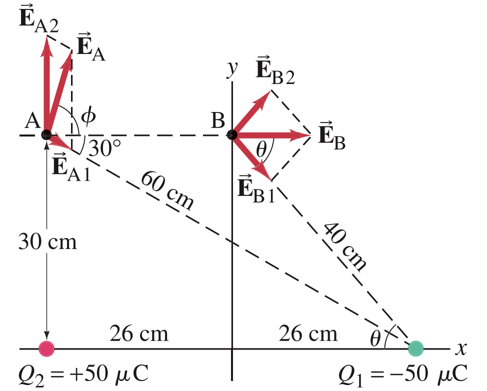
يتبع حلّ مسائل الكهرباء الساكنة إلى حدٍّ ما الإجراءات العامة لحلّ المسائل التي نوقشت في (البند 4 – 9). وسواء استخدمت المجال الكهربائي أو قوى الكهرباء الساكنة فإن الإجراءات متشابهة:

1. ارسم بعناية **مخططًا** وبالتحديد مخطّط جسم – حر لكلّ جسم على حدة مظهرًا القوى المؤثرة على الجسم جميعها، أو مظهرًا المجال الكهربائي الناتج من الشحنات جميعها المؤثرة الموجودة عند كلّ نقطة. وحدّد **اتجاه** كل قوة أو مجال كهربائي فيزيائيًّا: الشحنات المتماثلة تتنافر مع بعضها، أمّا الشحنات المختلفة فتتجاذب. وتشير المجالات مبتعدة عن الشحنة الموجبة ومقتربة من الشحنة السالبة. اظهر كلّ متجه قوة أو مجالًا على المخطّط وضَعْ علامة عليه.

2. **طبّقْ قانون كولوم** لتحسب قيمة القوة التي تؤثر بها كلّ شحنة مساهمة في جسم مشحون أو قيمة المجال الكهربائي عند نقطة ما. وتعامل فقط مع قيم الشحنات (تاركًا الإشارات السالبة جانبًا) واحصل على قيمة كل قوة أو مجال كهربائي.

3. **اجمع اتجاهيــاً** القوى المؤثرة على الجسم جميعها أو المجالات المساهمة عند نقطة ما للحصول على المحصلة. واستخدم **التماثل** (ولنقل جبرياً) متى أمكن ذلك.

دعنا الآن نرى كيف يمكن تطبيق صندوق حل المسائل أو استخدامه على الفرع (ب) من (المثال 16 – 9).



الشكل 16 – 28 (معاد) حساب المجال الكهربائي عند النقطتين A و B للمثال 16 - 9.

المثال 16-9 معاد.

احسب المجال الكهربائي عند النقطة B في (الشكل 16 – 28) الناتج من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج والحل:

1 - ارسم مخططًا دقيقًا. يظهر في (الشكل 16 – 28) **اتجاه** كل من المجالين الكهربائيين $\vec{E}_{B1}$ و $\vec{E}_{B2}$ وكذلك محصلة المجال $\vec{E}_B$. ويشير $\vec{E}_{B2}$ مبتعداً عن الشحنة Q_2 الموجبة. في حين يشير $\vec{E}_{B1}$ مقترباً من الشحنة Q_1 السالبة.

2 - طبق قانون كولوم لتجد قيم المجالات الكهربائية المساهمة. وبما أن B متساوي الأبعاد (40 cm حسب نظرية فيثاغورس) من الشحنتين المتساويتين، فإن قيمة كل من E_{B1} و E_{B2} هي ذاتها، وتعطى كالتالي:

$$E_{B1} = E_{B2} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(50 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.40\,\mathrm{m})^2}$$
$$= 2.8 \times 10^6\,\mathrm{N/C}.$$

3- اجمع اتجاهيًّا واستخدم التماثل أينما أمكن. المركبتان الصاديتان (y) لكل من $\vec{E}_{B1}$ و $\vec{E}_{B2}$ متساويتان ومتعاكستان. وبسبب هذا التماثل، فإنّ المجال الكلي E_B أفقي ويساوي $E_{B1}\cos\theta + E_{B2}\cos\theta = 2E_{B1}\cos\theta$. ومن (الشكل 16 – 28): $\cos\theta = 26\,\mathrm{cm}/40\,\mathrm{cm} = 0.65$. وعليه فإنّ:

$$E_B = 2E_{B1}\cos\theta = 2(2.8 \times 10^6\,\mathrm{N/C})(0.65)$$
$$= 3.6 \times 10^6\,\mathrm{N/C}$$

واتجاه $\vec{E}_B$ هو على امتداد اتجاه x الموجب.

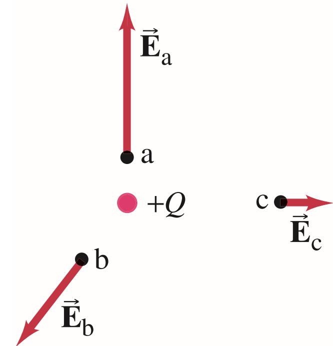
ملحوظة : لا يُظهِرُ الفرعُ (أ) من (المثال 16 – 9) أي تماثل مفيد.

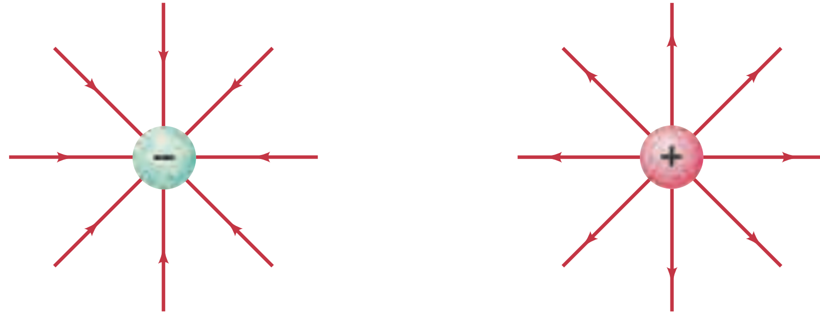
8-16 خطوط المجال

نظرًا لأنّ المجال الكهربائي متجه، فيشار إليه في بعض الأحيان بمتجه المجال. ويمكن أن نشير إلى المجال الكهربائي بأسهم عند النقاط المختلفة في وضعية ما مثل: أ، ب، جـ في (الشكل 16 – 29). واتجاهات كل من $\vec{E}_a$، $\vec{E}_b$ و $\vec{E}_c$ هي ذاتها اتجاهات القوى التي ظهرت سابقًا في (الشكل 16 – 23) بالرغم من أن الأطوال (القيم) مختلفة؛ لأننا نقسم F على q للحصول على E. ومع هذا، فإن الأطوال النسبية لـ $\vec{E}_a$، $\vec{E}_b$ و $\vec{E}_c$ هي ذاتها؛ لأننا نقسم في كل مرة على الشحنة q نفسها.

إنّ الإشارة إلى المجال الكهربائي بهذه الطريقة عند نقاط كثيرة ستظهر أسهما كثيرة تؤدي إلى اللبس سريعًا. ولكي نتفادى ذلك نستخدم طريقة أخرى هي طريقة خطوط المجال.

الشكل 16 – 29 متجه المجال الكهربائي مبيناً عند ثلاث نقاط والناتج من شحنة نقطية Q. (قارن مع الشكل 16 - 23).





الشكل 16 – 30 خطوط المجال الكهربائي (أ) بالقرب من شحنة نقطية موجبة وحيدة. (ب) بالقرب من شحنة نقطية سالبة وحيدة.

ولكي نتخيّل المجال الكهربائي: سنقوم برسم مجموعة من الخطوط لتشير إلى اتجاه المجال الكهربائي عند نقاط مختلفة في الفضاء. رُسمت **خطوط المجال الكهربائي** هذه (تدعى أحيانا خطوط القوة) بحيث تُشير إلى اتجاه القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة و الناتجة من مجال ما. ويبين (الشكل 16 – 30 أ) خطوط القوة الناتجة من شحنة اختبار موجبة معزولة ووحيدة. أمّا (الشكل 16 – 30 ب) فيظهر خطوط القوة الناتجة من شحنة سالبة معزولة ووحيدة. وتشير الخطوط في الفرع (أ) قطرياً من الشحنة نحو الخارج. وأما في الفرع (ب) فتشير الخطوط قطريًا إلى الداخل باتجاه الشحنة بسبب اتجاه القوة على شحنة الاختبار في كل حالة كما هو في (الشكل 16 – 26). ويظهر الشكل عدة خطوط فقط ممثلة للمجال. ولو أردنا، لأضفنا خطوطًا عديدة بينها لأن المجال الكهربائي يوجد هناك أيضاً. ونستطيع رسم الخطوط، سواء بدأت عند شحنة موجبة أو انتهت عند شحنة سالبة، بحيث يتناسب عددها طردياً مع قيمة الشحنة. لاحظ أنه بالقرب من الشحنة حيث يتعاظم المجال الكهربائي $(F \propto 1/r^2)$ تقترب الخطوط أكثر من بعضها بعضا. وهذه خاصية عامة لخطوط المجال الكهربائي : كلما اقتربت الخطوط من بعضها، فإن المجال الكهربائي سيكون أقوى في تلك المنطقة. وفي الحقيقة، يمكن رسم خطوط المجال بحيث يتناسب عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة العمودية على $\vec{\mathbf{E}}$ مع قيمة المجال الكهربائي.

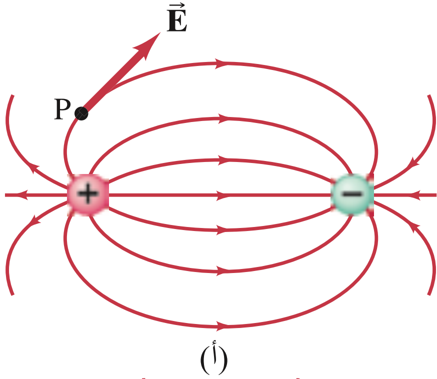
يُظهر (الشكل 16 – 31 أ) خطوط المجال الكهربائي الناتج من شحنتين متساويتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة، وهو **الجمع** الذي يعرف **بالثناقطبي الكهربائي**. وتنحني خطوط المجال الكهربائي في هذه الحالة متجهة من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة. واتجاه المجال الكهربائي عند أي نقطة هو اتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة كما هو مبين بسهم المتجه $\vec{\mathbf{E}}$ عند النقطة P. ولتقنع نفسك أن هذا هو النمط الصحيح لخطوط المجال الكهربائي: فإنك تستطيع القيام بعدة حسابات كتلك التي أُجريت في (المثال 16 – 9) خصوصاً لهذه الحالة (انظر الشكل 16 – 28). ويظهر (الشكل 16 – 31 ب) خطوط المجال الكهربائي لشحنتين موجبتين متساويتين. أما (الشكل 16 – 31 جـ) فيظهر ذلك لشحنتين غير متساويتين $-Q$ و $+2Q$. لاحظ أنّ عدد خطوط المجال التي تغادر $+2Q$ هي ضعف الخطوط التي تدخل $-Q$ (يتناسب عدد الخطوط مع قيمة Q). ونرى أخيراً في (الشكل 16 – 31 د) المجال بين لوحين متوازيين يحملان شحنتين متساويتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة. لاحظ أنّ خطوط المجال الكهربائي بين اللوحين تبدأ عمودية على سطحي اللوحين الفلزيين (وسنرى لماذا يكون هذا صحيحًا في البند التالي) وتذهب مباشرة من لوح إلى آخر كما كنّا نتوقع؛ لأنّه إذا وُضِعت شحنة اختبار بين اللوحين، فستشعر شحنة الاختبار بتنافر شديد مع اللوح الموجب، وانجذاب شديد نحو اللوح السالب. وتكون خطوط المجال الكهربائي بين لوحين قريبين جدًّا من بعضهما متوازية ومتساوية البعد عن بعضها بعضا في المنطقة الوسطى بين اللوحين، وتتهدب نحو الخارج قرب الحواف. وعليه، فإنّ قيمة المجال الكهربائي ستكون نفسها عند النقاط جميعها في المنطقة الوسطى بين اللوحين. ونستطيع أن نكتب:

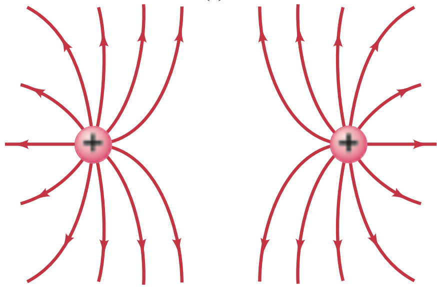
$$E = \text{مقدار ثابت} \quad \left[\begin{array}{c}\text{بين لوحين متوازيين قريبين من بعضهما بعضا}\\ \text{ومشحونين بشحنتين متساويتين ومختلفتين بالإشارة}\end{array}\right] \qquad (6-16)$$

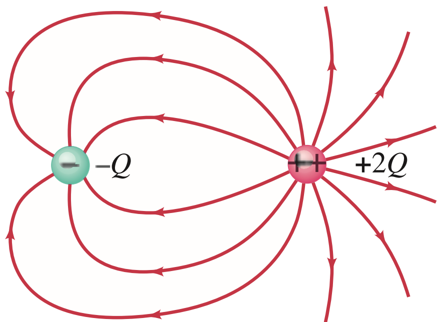
وغالباً ما يمكن إهمال تهدُّب المجال قرب الحواف خصوصًا عندما تكون المسافة الفاصلة بين اللوحين صغيرة مقارنة مع أبعاد اللوحين.*

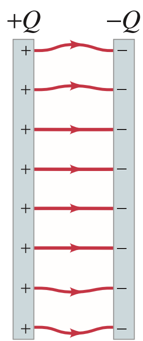
خطوط المجال الكهربائي

الشكل 16 – 31 خطوط المجال الكهربائي لأربعة توزيعات للشحنات.







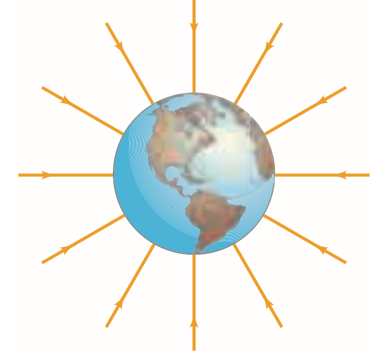


* تعطى قيمة المجال الكهربائي الثابت بين لوحين متوازيين كالتالي: $E = Q/\epsilon_0 A$، حيث تمثل Q قيمة الشحنة على كل لوح. أما A فتمثل مساحة أحد اللوحين. وسنرى هذا في (البند الاختياري 16 – 10) لقانون غاوس.

ونلخّص خواصّ خطوط المجال كالتالي:

1. تشير خطوط المجال الكهربائي إلى اتجاه المجال الكهربائي الذي يتجه باتجاه مماسي لخط المجال عند أي نقطة.
2. ترسم الخطوط بحيث تتناسب قيمة المجال الكهربائي E مع عدد الخطوط التي تخترق وحدة مساحة عمودية على الخطوط. وكلما اقتربت الخطوط من بعضها كان المجال أشد.
3. تبدأ خطوط المجال الكهربائي عند الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة، ويتناسب العدد مع مقدار الشحنة.

لاحظ أيضاً أنّ خطوط المجال لا تتقاطع أبداً. لِمَ لا تتقاطع؟ يعزى السبب في ذلك إلى أنه عندما يتقاطع أي خطين مع بعضهما بعضا، فإنّ المجال سيبدو وكأنّ له اتجاهين عند تلك النقطة؛ وهذا غير منطقي.



الشكل 16 – 32 يتجه مجال جاذبية الأرض عند أي نقطة باتجاه مركز الأرض (تشير القوة على أي كتلة باتجاه مركز الأرض).

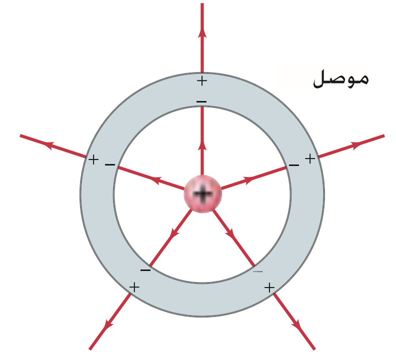
مجال الجاذبية

يمكن تطبيق مبدأ المجال على قوة الجاذبية. وعندها نستطيع القول بأنّ هناك جاذبية لكلِّ جسمٍ ذي كتلة. ويستطيع جسم ما أن يجذب جسماً آخر إليه بواسطة **مجال الجاذبية**. قد يقال على سبيل المثال بأن الأرض تمتلك مجال جاذبية (شكل 16 – 32) وهو المسؤول عن قوة الجذب بين الأجسام. ويعرف مجال الجاذبية على أنه القوة لكل وحدة كتلة. وعليه، فإن قيمة مجال جاذبية الأرض فوق سطح الأرض (GM_E/r^2)، حيث تمثل M_E كتلة الأرض، في حين تمثل r بعد نقطة القياس عن مركز الأرض، أما G فثابت الجذب (الفصل 5).

ولكن عند سطح الأرض، فإنّ r نصف قطر الأرض، ومجال الجاذبية يساوي g . التسارع الناتج من الجاذبية . ويمكن أن يتم حساب مجال الجاذبية خارج نطاق الأرض عند أي نقطة كمجموع حدود ناتجة من الأرض والشمس والقمر . وكذلك الأجسام ذات المساهمات المميزة جميعها.

9-16 المجالات الكهربائية والموصلات

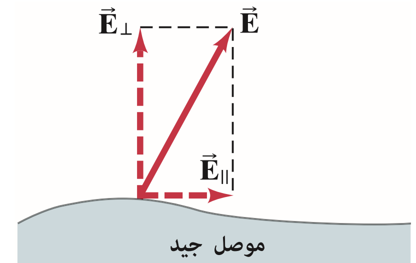
سنناقش الآن بعض خصائص الموصلات. أولًا، يكون المجال الكهربائي صفرًا في الحالة الساكنة؛ أي عندما تكون الشحنات ساكنة. وإذا كان هناك مجال كهربائي داخل الموصل، فستتولد قوة على الإلكترونات الحرة داخله، مما سيجعلها تبدأ بالتحرك إلى أن تصل إلى مواقع ينعدم عندها المجال الكهربائي لتؤول القوة الكهربائية عليها بعد ذلك إلى الصفر.



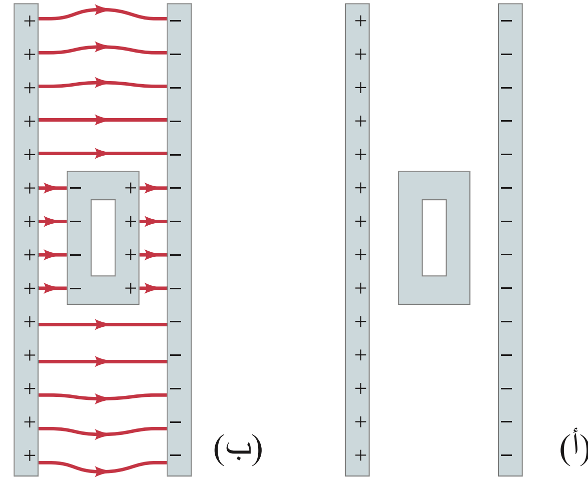
الشكل 16 – 33 تحث شحنة داخل قشرة فلزية كروية شحنة على سطحها. ومع أن المجال الكهربائي موجود خارج القشرة، إلا أنه ينعدم داخل الموصل نفسه.

ويترتب على هذا المنطق بعض النتائج المثيرة. إحدى هذه النتائج هي توزيع الشحنات الزائدة على سطح الموصل. ويمكنك أن تتخيل تنافر الشحنات السالبة مع بعضها داخل الموصل المشحون بشحنة سالبة، وتسارعها باتجاه السطح لتصل إلى أبعد مسافة ممكنة تفصلها عن بعضها بعضًا. وهناك نتيجة أخرى سنستعرضها الآن. افرض أن هناك شحنة موجبة Q محاطة بموصل فلزي غير مشحون ومعزول، ويأخذ شكل قشرة كروية (شكل 16–33). وبسبب عدم إمكانية وجود مجال كهربائي داخل الفلز، فإن خطوط المجال التي ستغادر الشحنة الموجبة يجب أن تنتهي عند الشحنات السالبة على السطح الداخلي للفلز؛ أيْ أنّ مقدارًا متساويًا من الشحنات السالبة $-Q$ سيستحث على السطح الداخلي للقشرة الكروية. وبما أن القشرة متعادلة كهربائياً فهذا يعني ضرورة وجود شحنة موجبة على السطح الخارجي للقشرة مقدارها $+Q$. وبالرغم من عدم وجود أي مجال كهربائي داخل الفلز، فإن هناك مجالًا كهربائيًّا خارجه كما هو مبين في (الشكل 16 – 33) كما لو أن الفلز غير موجود أصلاً هناك.

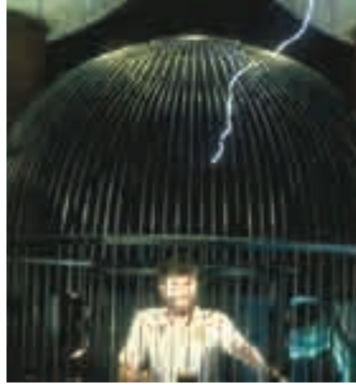
الشكل 16 – 34 إذا كانت هناك مركبة للمجال الكهربائي $\vec{E}$ موازية لسطح الموصل $\vec{E}_{\parallel}$ فإنها ستعمل على تسريع الإلكترونات. وأما في الحالة الساكنة، فإن $\vec{E}_{\parallel}$ تعادل الصفر حتماً ويكون المجال الكهربائي عمودياً على سطح الموصل : $\vec{E} = \vec{E}_{\perp}$



وإحدى الصفات التي تجمع المجالات الكهربائية الساكنة والموصلات هي أنّ المجال الكهربائي يكون دائمًا عموديًّا على سطح الموصل الخارجي. وإذا وُجدت مركبة للمجال الكهربائي $\vec{E}$ موازية للسطح (شكل 16 – 34) فإنها ستؤثر بقوة على الإلكترونات الحرّة الموجودة على السطح، مسبِّبةً حركة الإلكترونات على امتداد السطح إلى أن تصل الإلكترونات إلى مواقع تختفي عندها القوة المؤثرة فيها بالاتجاه الموازي للسطح؛ أيْ إلى أن يصبح المجال الكهربائي عموديًّا على السطح. وتنطبق هذه الصفات فقط على الموصلات. أما داخل غير الموصلات حيث لا يوجد أي إلكترونات حرة، فيمكن لمجال كهربائي ساكن أن يوجد. وهذا ما سنتناوله في الفصل القادم. وبالإضافة إلى ذلك، فليس من الضروري للمجال الكهربائي خارج غير الموصل (العازل) أن يصنع زاوية °90 مع السطح.



الشكل 16 - 35
(المثال 16 - 10).



الشكل 16 – 36 يوجد مجال كهربائي قوي بجوار "قفص فارادي" هذا. وهو قوي لدرجة أنّ الإلكترونات المتناثرة في الغلاف الجوي تُسرِّعُ إلى الطاقة الحركية الضرورية لطرد الإلكترونات خارج ذرات الهواء، مسببة انهياراً للشحنات التي تنساب إلى القفص الفلزي أو منه. ومع هذا، فإن الشخص داخل القفص لن يتأثر أو يشعر بها.

تطبيق الفيزياء
الحجب الكهربائي

المثال المفاهيمي 16-10 **الحجب (الحماية) والأمان خلال العاصفة.**

وضع صندوق فلزي متعادل كهربائيًا ومفرغ من الداخل بين لوحين متوازيين ومشحونين كما هو مبين في (الشكل 16 – 35 أ). ما طبيعة المجال داخل الصندوق؟

الإجابة: إذا كان الصندوق الفلزي صلباً وغير مفرغ، فإن الإلكترونات الحرة داخل الصندوق ستعيد ترتيب نفسها على امتداد السطح إلى أن تلغي المجالات الفردية جميعها لهذه الإلكترونات بعضَها بعضًا داخل الصندوق. وبذلك يصبح المجال الكهربائي داخل الصندوق صفرًا. ولكن إذا كان الصندوق مفرغا، فإن المجال الخارجي المرتبط به لن يتغير لأن الإلكترونات الحرّة داخل الفلز ستبقى قادرة على الحركة بحرية وتتجه نحو السطح. لذا، فإن المجال داخل الصندوق الفلزي المفرغ أيضًا سيكون مساويًا للصفر. وتكون خطوط المجال مشابهة لتلك المبينة في (الشكل 16 – 35 ب). ويكون الصندوق الموصل المستخدم بهذه الطريقة أداة فاعلة لحماية الأجهزة الحساسة والدارات الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية غير المرغوب بها. ونستطيع أن نرى أيضًا بأنّ داخل سيارة محاطة بالفلزات يعدّ مكانًا آمنًا نسبيًّا للبقاء فيه خلال العاصفة المصحوبة بالبرق. انظر أيضًا إلى (الشكل 16 – 36) حيث يحمي "قفص" مفرغ من الداخل شخصاً يجلس داخله خلال تفريغ كهربائي هائل.

* 16-10 قانون غاوس

يعدّ قانون غاوس الذي طوره الرياضي العبقري غاوس (1777 – 1855) من العلاقات المهمة في الكهرباء، حيث يربط بين الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي. كما يعدّ نسخة أكثر أناقة من قانون كولوم وأكثر عمومية. ويتضمن هذا القانون مفهوم **التدفق الكهربائي** الذي يشير إلى المجال الكهربائي المار خلال مساحة ما. ويُعرّف التدفق الكهربائي Φ_E لمجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ يمر خلال مساحة A كما هو مبين في (الشكل 16 – 37 أ) كالتالي:

$$\Phi_E = EA\cos\theta$$

حيث تمثل θ الزاوية بين اتجاه المجال الكهربائي والخط المرسوم العمودي على المساحة. ويمكن للتدفق أن يكتب بطريقة مكافئة:

$$\Phi_E = E_\perp A = EA_\perp \qquad (7-16)$$

حيث تمثل $E_\perp = E\cos\theta$ مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على المساحة (شكل 16 – 37 ب). وبالمثل، فإن $A_\perp = A\cos\theta$ تمثل مسقط المساحة A عموديًّا على المجال $\vec{\mathbf{E}}$ (شكل 16 – 37 جـ).

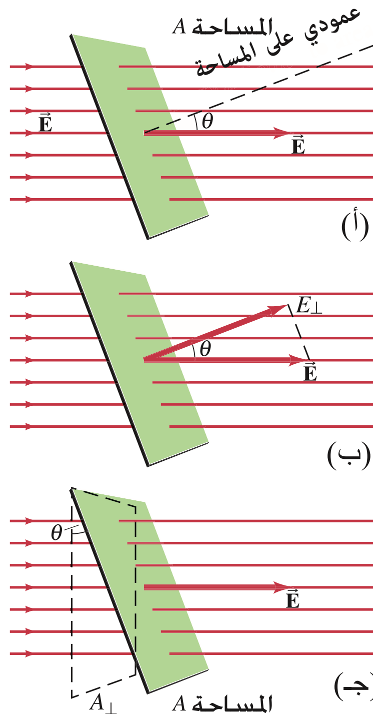
ويتميز التدفق الكهربائي بتفسير سهل بديهي بدلالة خطوط المجال. وقد ذكرنا في (البند 16 – 8) أنّ خطوط المجال يمكن رسمها دائمًا بحيث يكون عددها (N) المار خلال وحدة مساحة عمودية على المجال $(A_\perp)$ يتناسب مع قيمة المجال (E)؛ أيْ أن $E \propto N/A_\perp$.

وعليه،

$$N \propto EA_\perp = \Phi_E \qquad (8-16)$$

لذا، فإنّ التدفّق خلال مساحة ما يتناسب مع عدد الخطوط المارة خلال تلك المساحة.

الشكل 16 – 37 (أ) مجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ يمر خلال مساحة مسطحة A. (ب) $E_\perp = E\cos\theta$ هي مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على سطح مساحته A. (جـ) $A_\perp = A\cos\theta$ هي مسقط المساحة A (المتقطعة) عمودياً على المجال $\vec{\mathbf{E}}$.



يتضمّن قانون غاوس التدفّق الكلّي خلال سطح مغلق – وهو سطح لأيّ شكل – يحجز داخله حجمًا من الفضاء. ولأي سطح ماثل كما هو مبين في (الشكل 16 – 38). فإنّنا نقسم السطح إلى مساحات ضئيلة جدًّا وعديدة: ΔA_1 و ΔA_2 و ΔA_3... وهكذا دواليك. ونقسم السطح بحيث تكون كل ΔA صغيرة كفاية لدرجة يمكن عندها اعتبارها مسطحة. وعند ذلك، يمكن اعتبار المجال الكهربائي ثابتًا خلال كل ΔA. وأنّ التدفق الكلّي خلال السطح كلّه هو مجموع التدفقات الفردية جميعها خلال كل مساحة من هذه المساحات الضئيلة:

$$\Phi_E = E_1\,\Delta A_1 \cos\theta_1 + E_2\,\Delta A_2 \cos\theta_2 + \cdots$$
$$= \sum E\,\Delta A \cos\theta = \sum E_{\perp}\,\Delta A,$$

ويعني الرمز Σ "مجموع". رأينا في (البند 16 – 8) أنّ عدد خطوط المجال البادئة عند شحنة موجبة ما ومنتهية عند شحنة سالبة ما تتناسب مع مقدار الشحنة. وعدد الخطوط المحصلة N المشيرة نحو خارج أي سطح مغلق (عدد الخطوط المشيرة نحو خارج أي سطح مغلق مطروحًا منه عدد الخطوط المشيرة نحو داخله) يجب أن يتناسب مع الشحنات الصافية المحتواة داخل السطح Q_{encl}. ولكن من (المعادلة 16– 8) نجد أن محصلة عدد الخطوط N تتناسب مع التدفق الكلي Φ_E:

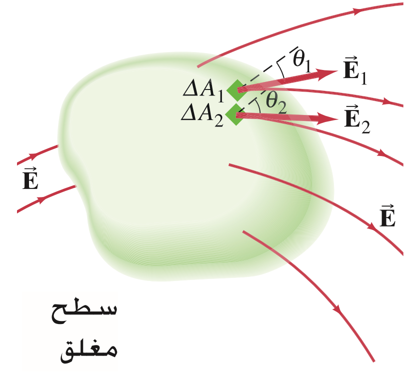
$$\Phi_E = \sum_{\text{مغلق سطح}} E_{\perp}\,\Delta A \propto Q_{\text{encl}}$$

وثابت التناسب هو $1/\epsilon_0$، وهو متطابق مع قانون كولوم. إذن،

$$\sum_{\text{مغلق سطح}} E_{\perp}\,\Delta A = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \qquad \textbf{(9 – 16)}$$

حيث إنّ الجمع (Σ) يشمل أي سطح مغلق، وتمثل Q_{encl} الشحنات الصافية المحتواة داخل السطح؛ وهذا هو **قانون غاوس**.

يمكن استخدام قانوني **كولوم وغاوس** لتحديد المجال الكهربائي الناتج من أي توزيع للشحنات (الساكنة). ويعدّ قانون غاوس مفيدًا عندما يكون توزيع الشحنات بسيطًا ومتماثلا. ومع هذا، فيجب علينا أن نختار السطح "الغاوسي" بعناية فائقة بحيث نستطيع تحديد $\vec{\mathbf{E}}$. وعادةً ما نختار سطحًا ما يُظهر التماثل الضروري بحيث تكون E ثابتة على السطح كلّه، أو أجزاء منه.



الشكل 16 – 38 تمر خطوط المجال الكهربائي خلال سطح مغلق. ويقسم السطح إلى مساحات صغيرة وكثيرة العدد؛ $\Delta A_1, \Delta A_2, \cdots$ وهكذا دواليك. تظهر الصورة اثنتين منهما فقط.

قانون غاوس

المثال 16-11 قشرة كروية مشحونة.

تمتلك قشرةٌ كرويّةٌ رقيقة نصف قطرها r_0 شحنة صافية Q، موزعة بانتظام عليها (شكل 16 – 39). حدّد المجال الكهربائي عند نقطتين (أ) خارج القشرة . (ب) داخل القشرة.

النهج: بما أن الشحنة موزعة بالتماثل، فيجب أن يكون المجال الكهربائي متماثلا. وعليه، فإن المجال خارج القشرة يجب أن يتوجّه قطريًّا صوب الخارج (صوب الداخل إذا كانت $Q < 0$) ويجب أن يعتمد على r فقط.

الحل: (أ) سيمتلك المجال الكهربائي القيمة نفسها عند النقاط جميعها التي على سطح غاوسي تخيلي عند اختيارنا للسطح على شكل كرة نصف قطرها $(r > r_0)$ ولها مركز القشرة نفسه كما هو مبين في (الشكل 16 – 39) (الدائرة المتقطعة A_1 (dashed circle)). وبما أن $\vec{\mathbf{E}}$ عمودية على هذا السطح، فإن قانون غاوس (مع $Q_{\text{encl}} = Q$ في المعادلة 16 – 9):

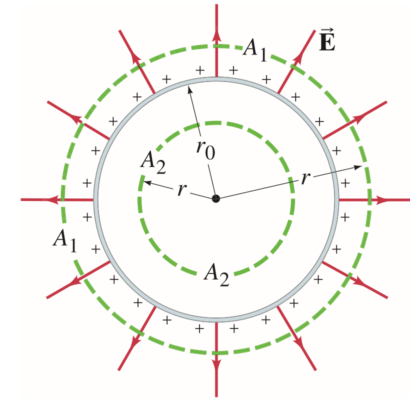
$$\sum E_{\perp}\,\Delta A = E\sum \Delta A = E(4\pi r^2) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

وتمثل $4\pi r^2$ المساحة السطحية للكرة (سطح غاوس) ونصف قطرها r. أي:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2} \qquad [r > r_0]$$

لذلك، فإنّ المجال خارج قشرة كروية مشحونة بشحنة موزّعة بانتظام هو نفسه كما لو أنّ الشحنة كانت مجمّعة عند المركز كشحنةٍ نقطيّةٍ

الشكل 16 – 39 رسم مقطع عرضي لقشرة كروية رقيقة نصف قطرها r_0 تحمل شحنة صافية Q موزعة بانتظام. A_1 و A_2 يمثلان سطحين غاوسين نستخدمهما لتحديد $\vec{\mathbf{E}}$. (مثال 16 - 11).



(ب) وكذلك يجب أن يكون المجال داخل القشرة متماثلا. وعليه، فإنّ E يجب أن تمتلك مرة أخرى القيمة نفسها عند النقاط جميعها التي على السطح الغاوسي الكروي (A_2 في الشكل 16 – 39) ذي المركز المتطابق مع القشرة. لذا، فإنّ E يمكن أن تؤخذ خارج المجموع كعامل مشترك. وبما أنّ $Q_{encl} = 0$ لعدم وجود شحنة داخل السطح، فإنّ :

$$\sum E_{\perp}\,\Delta A = E\sum \Delta A = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0} = 0$$

وعليه فإنّ:

$$E = 0 \qquad [r < r_0]$$

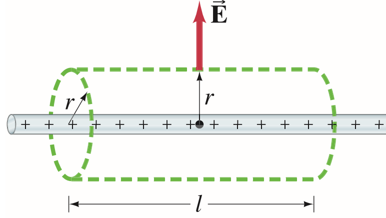
داخل قشرة كروية منتظمة الشحنة.

ويمكن تطبيق النتائج المفيدة (للمثال 16 – 11) أيضًا على موصل كروي صلب منتظم مشحون نتيجة وجود الشحنة كلها في طبقة رقيقة على السطح (بند 16 – 9).

التمرين ح: يمتلك سلك مستقيم طويل جدًّا شحنة منتظمة لكل وحدة طول Q/L. أثبت أن المجال الكهربائي عند نقاط قريبة (ولكن للخارج) من السلك وبعيدة عن الحواف يعطى كالتالي :

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r}\,\frac{Q}{L}$$

باستخدام السطح الأسطواني الغاوسي (المتقطع) (dashed) المبين في (الشكل 16 – 40) . [تلميح: لا يوجد تدفق كهربائي خلال النهايتين المسطحتين للأسطوانة].



الشكل 16 – 40 حساب $\vec{E}$ الناتج من خط طويل جداً من الشحنات، وتمرين هـ عندما كانت الأسطوانة (المنقطة) هي السطح الغاوسي

المثال 16-12 E عند سطح موصل.

أثبت أن المجال الكهربائي خارج سطح أي موصل جيد مهما كان شكله، يعطى كالتالي:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

حيث تمثل σ كثافة الشحنة السطحية (Q/A) على الموصل عند تلك النقطة.

النهج: نختار صندوقًا أسطوانيًّا صغيرًا كسطح غاوسي، ارتفاعه صغير لدرجة أنّ إحدى نهايتيه الدائريتين تكاد تقع فوق الموصل (شكل 16 – 41)، في حين تقع نهايته الأخرى أسفل سطح الموصل. وجوانبه عمودية عليه.

الحل : لا يوجد مجال كهربائي داخل الموصل، وهو عمودي على السطح خارج الموصل مباشرة (بند 16 – 9). لذا، فإنّ التدفّق الكهربائي يمرّ فقط خلال الطرف الخارجي للصندوق الأسطواني، في حين لا يمر أي تدفق خلال الجوانب القصيرة أو الطرف الداخلي. ونختار المساحة A (للطرف الأسطواني المسطح فوق سطح الموصل) صغيرة كفاية بحيث نضمن أن تكون E منتظمة فوقها. وعندها يعطي قانون غاوس:

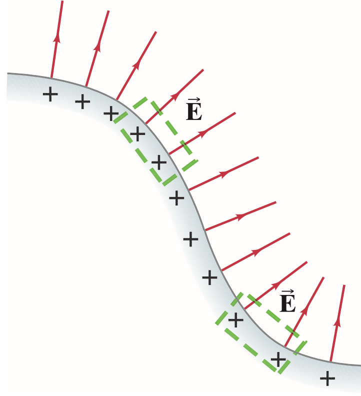
$$\sum E_{\perp}\,\Delta A = EA = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

وعليه فإنّ:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \qquad [\text{عند سطح الموصل}]$$

وتنطبق هذه النتيجة على أي موصل مشحون بانتظام مهما اختلف شكله. ومن ضمنها الصفحة المسطحة: وسيكون المجال الكهربائي ثابتًا ومساويًا لـ σ/ϵ_0 .

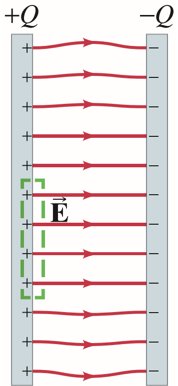
الشكل 16 - 41 المجال الكهربائي بجوار سطح موصل. ويظهر الشكل صندوقين أسطوانيين صغيرين متقطعين. (مثال 16 - 12).



ويعطي هذا المثال الأخير المجال بين لوحين متوازيين نوقشا من قبل في (الشكل 16 – 31 د). وإذا كان اللوحان كبيرين مقارنة بالمسافة الفاصلة بينهما، فإن خطوط المجال ستكون عمودية على اللوحين ومتوازية مع بعضها بعضًا، ما عدا القريبة من الحواف. وعليه، فإن المجال الكهربائي (انظر شكل 16 – 42 الذي يُظهر السطح الغاوسي نفسه كما في شكل 16 – 41) هو أيضًا :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q/A}{\epsilon_0} \qquad \left[\text{بين لوحين من مواسع/مكثف متوازي اللوحين المشحونين بشحنتين مختلفتين}\right] \qquad \mathbf{(10 – 16)}$$

حيث $Q = \sigma A$ وهي الشحنة على أحد اللوحين.



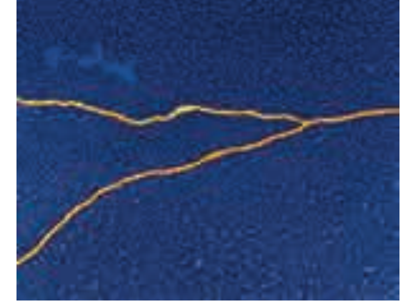
الشكل 16 - 42 المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين منتظم ويساوي $E = \sigma/\epsilon_0$

* 11-16 القوى الكهربائية في العلوم الحياتية الجزيئية تركيب DNA وتناسخه

تطبيق الفيزياء

داخل الخلية: النظرية الحركية بالإضافة إلى القوة الكهروسكونية.

تُعرف دراسة تركيب الخلايا الحيّة على المستوى الجزيئي ووظائفها بالعلوم الحياتية الجزيئية. وهو موضوع مهم للتطبيقات الفيزيائية. وبما أنّ معظم الخلية من الداخل ماء، فيمكن لنا أن نتخيلها كبحر هائل من الخلايا دائمة الحركة (كما في النظرية الحركية، الفصل 13) يصدم بعضها بعضا بطاقات حركية ذات مقادير مختلفة. وتتفاعل هذه الجزيئات مع بعضها بطرق مختلفة – تفاعلات كيميائية (بناء وهدم الروابط بين الذرات) وتفاعلات سريعة، أو اتحادات ناجمة عن تجاذب كهربائي ساكن بين الجزيئات. إنّ العمليات الكثيرة في الوقت الحالي والتي تحدث داخل الخلية ناجة من الحركة الجزيئية العشوائية "الحرارية" إضافة إلى أثر ترتيب القوة الكهربائية الساكنة. وتُستخدم هذه الأفكار حاليًّا لتحليل بعض العمليات الخلوية الأساسية المتضمنة جزيئات الجاهرية (جزيئات كبيرة). إن الصورة التي نعرضها هنا غير مرئية في الواقع. ومع هذا، فهي نموذج لما يحدث بناءً على النظريات المقبولة فيزيائيًا في الوقت الحالي أو النتائج العملية.



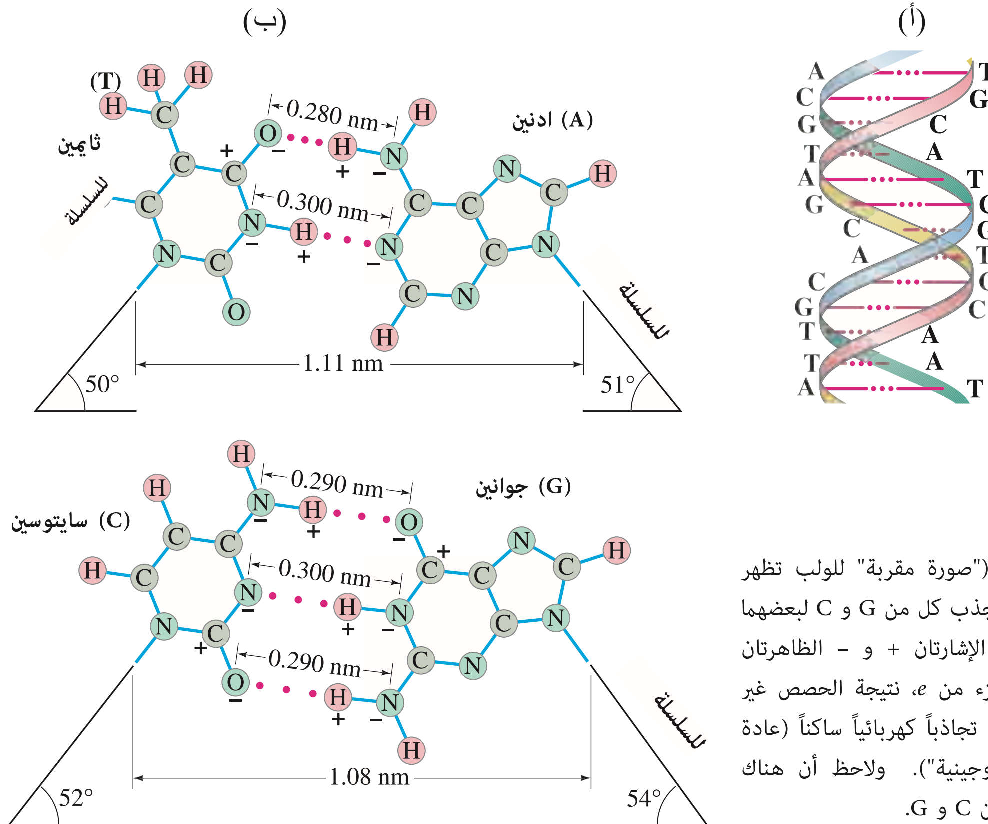
الشكل 16 - 43 انقسام DNA في خلية HeLa البشرية السرطانية .وهذه صورة ذات ألوان زائفة أخذت بواسطة مجهر إلكتروني نفاذي (TEM تم مناقشته في الفصل 27).

إن المعلومات الجينية التي تنتقل من جيل إلى آخر محتواة في الكروموسومات التي تتكوّن من جينات. ويحتوي كل جين على المعلومات اللازمة لانتاج نوع معين من جزيء بروتيني. وتُبنى المعلومات الجينية المحتواة في الجين داخل الجزيء الرئيس للكروموسوم DNA (الحمض النووي deoxyribonucleic) من جزيئات صغيرة تُعرف بقواعد نيوكليوتايد. وهي تنقسم إلى أربعة أنواع هي: أدانين (A)، وسايتوسين (C)، وجوانين (G)، وثايمين (T).

تطبيق الفيزياء

بنيان DNA.

ويتكون DNA الكروموسوم بشكل عام من جديلتي DNA (حبلين) طويلتين تلتفان حول بعضهما على شكل "لولب ثنائي". كما أن المعلومات الجينية محتواة في الترتيب المحدد للقواعد الأربع (A، و C، و G، و T) وعلى امتداد كل حبل. وكما هو مبين في (الشكل 16 – 44). فإنّ كلًّا من الحبلين يجذب الآخر إليه بقوى كهربائية ساكنة؛ أي بواسطة جذب الشحنات الموجبة للشحنات المخالفة لها بالإشارة (الشحنات السالبة). ونرى في (الشكل 16 – 44 أ) أنّ A (أدانين) على أحد الحبلين يكون مواجهًا لـ T على الحبل الآخر دائمًا.



الشكل 16 - 44

(أ) مقطع من DNA الثنائي اللولبي. (ب) ("صورة مقربة" للولب تظهر كيفية جذب كل من A و T لبعضهما، وكيفية جذب كل من G و C لبعضهما بواسطة القوى الكهربائية الساكنة. وتمثل الإشارتان + و – الظاهرتان على بعض الذرات شحنات صافية، وعادة جزء من *e*، نتيجة الحصص غير المتساوية للإلكترونات. وتعني النقاط الحمراء تجاذباً كهربائياً ساكناً (عادة ما يدعى "رابطة ضعيفة" أو "رابطة هيدروجينية"). ولاحظ أن هناك رابطتين ضعيفتين بين A و T، وثلاث روابط بين C و G.

ملحوظة: *microscopic* تعني مجهري في علوم الأحياء. أما في الفيزياء فمن الأفضل استعمال مصطلح" دون الجهريّ" لأن الفيزياء تتعامل مع عينات أصغر بكثير من العينات البيولوجية

وبالمثل، فإنّ G تقع دائمًا مقابل C. ويحدث هذا التأثير المرتب بسبب أشكال A و T و C و G حيث لا يمكن لـ T إلّا أنّ تكون قريبة من A فقط وكذلك G بالنسبة إلى C. وهذه هي الحالة الوحيدة الممكنة كنتيجة لهذا التقارب بين الأجزاء المشحونة. حيث يمكن للقوّة الكهربائية الساكنة أن تعدّ كبيرة كفاية لإمساكهم معًا ولفترة زمنية قصيرة (شكل 16 – 44 ب) مشكلة ما يعرف بـ "الروابط الضعيفة". وتوجد القوة الكهربائية الساكنة بين A و T، وكذلك بين C و G بسبب وجود أجزاء مشحونة لهذه الجزيئات. وهذه الشحنات ناجمة من قضاء بعض الإلكترونات في كل من هذه الجزيئات لفترة زمنية أطول. وهي تدور حول ذرة ما مقارنة بالفترة الزمنية التي تقضيها وهي تدور حول الذرة الأخرى. وعلى سبيل المثال، فإن الإلكترون الذي يرتبط عادةً بذرة الهيدروجين في أدانين (A) (الجزء العلوي للشكل 16 – 44 ب) يقضي بعضًا من وقته يدور حول ذرة N المجاورة (انظر الفصل التاسع والعشرين لمعرفة المزيد). وعليه، فإنّ N سيصبح لها شحنة سالبة صافية و لـ H شحنة موجبة صافية. لتنجذب ذرة H^+ من أدانين* إلى ذرة O^- من ثيامين. وقيمة هاتين الشحنتين الصافيتين + و – عادة هي جزء من e (الشحنة على الإلكترون) مثل $0.2e$ أو $0.4e$.

كيف حصل هذا الترتيب المبين في (الشكل 16 – 44)؟ حصل هذا الترتيب عندما نسخ الـ DNA (ضاعف) نفسه مباشرة قبل انقسام الخلية. في الواقع، إنّ ترتيبَ A مقابل T وترتيب G مقابل C أمرٌ حاسمٌ لضمان انتقال المعلومات الجينية بدقة إلى الجيل التالي. عملية النسخ مبينة بصورة مبسطة في (الشكل 16 – 45). ينفصل حبلان من DNA (بمساعدة الإنزيمات التي تعمل أيضًا خلال القوة الكهربائية الساكنة) تاركة الأجزاء المشحونة للقواعد مكشوفة. وما أن يبدأ النسخ، نستطيع عندئذ متابعة كيفية الترتيب الصحيح للقواعد عن طريق تركيز نظرنا على جزيء G المشار إليه بالسهم على الحبل السفلي في (الشكل 16– 45). وهناك قواعد من النيوكليوتايد كثيرة تتحرك جيئةً وذهابًا في السائل الخلوي وغير مربوطة مع الأنواع الأربعة. وأما القاعدة الوحيدة من القواعد الأربعة التي ستشعر بالانجذاب إلى G إذا ارتدت بالقرب منها فهي C. ولا تترتب الشحنات على القواعد الثلاث الأخرى بحيث إنها تستطيع الاقتراب من G. ومع هذا، فلن يكون هناك أي قوة تجاذب ملموسة تؤثر فيها. وتذكر أن القوة تتناقص بسرعة مع المسافة $(\propto 1/r^2)$. ولأن G لا تجذب A أو T أو G كفايةً، فإن A و T و G ستطرد بعيدًا بالتصادمات مع الجزيئات الأخرى قبل أن تستطيع الأنزيمات من إلصاقها بالسلسلة المتنامية (رقم 3). ومع هذا، فإن القوة الكهربائية الساكنة غالبًا ما تمسك C في مواجهة G لفترة طويلة كافية، فيستطيع الأنزيم إلصاق C بنهاية السلسلة الجديدة المتنامية.

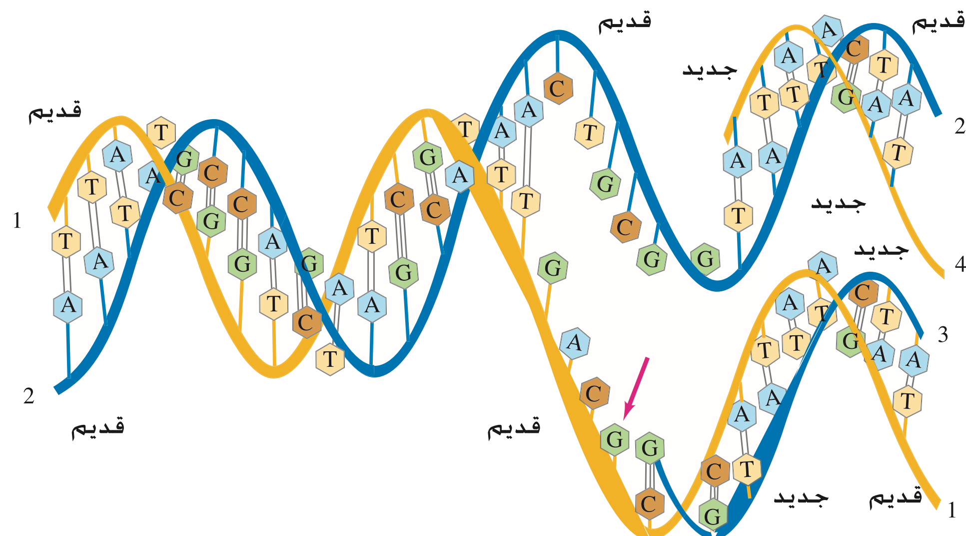
تطبيق الفيزياء

نسخ DNA

واستنادًا إلى هذا، نرى أنّ القوى الكهربائية الساكنة هي المسؤولة عن اختيار القواعد في الترتيب المناسب خلال النسخ بحيث تمرر المعلومات الجينية بدقة إلى الجيل التالي. لاحظ في (شكل 16 – 45) أن الحبل الجديد 4 له ترتيب القواعد نفسه كالحبل القديم 1 . والحبل الجديد 3 كالحبل القديم 2. وعليه فإنّ اللولبين الجديدين الثنائيين 1 – 3 و 2 – 4 يتشابهان مع اللولب الأصلي 1 – 2.

* وعندما تكون H^+ مشاركة، فإنّ الرابطة الضعيفة التي تصنعها مع شحنة سالبة مجاورة مثل O^- هي نسبيًّا قوية بين الروابط الضعيفة (جزئياً بسبب أن H^+ صغيرة جدا) ويشار إليها بالرابطة الهيدروجينيةّ (البند 3 – 29).

الشكل 16 - 45 نسخ DNA.



وتُقدم عملية نسخ DNA هذه كما لو أنّها حدثت بطريقة دقيقة. وكأنّ كلَّ جُزيءٍ يعرف دوره فيذهب إلى مكانه المحدّد كالنحل في خليته. ولكن ليس هذا ما يحدث فعلا. فقوى التجاذب بين الشحنات الكهربائية للجزيئات هي نوعاً ما ضعيفة، وتصبح ذات قيمة فقط عندما تقترب من بعضها لتتكون عدة "روابط ضعيفة". وبالفعل، إذا لم تكن الأشكال كما يجب، فلن يكون هناك أي جذب كهربائي ساكن. وهذا هو سبب وجود بعض الأخطاء. وعليه، فإنّ القوّة الكهربائيّة الساكنة تعمل على جلب الترتيب من الفوضى من الحركة العشوائية للجزيئات.

وهنالك نتيجة أخرى لسرعات الجزيئات العشوائية (الحرارية) في الخلية (النظرية الحركية) تنجم عن الاستنساخ (*cloning*). وحتى على مستوى بكتيريا إي كولي، فعندما تنقسم الخلية، فإن DNA لخليتي البكتيريا الجديدتين يكون متماثلًا تقريبًا. وحتى لو كان DNA متماثلًا تمامًا، فإنّ خليتي البكتيريا لن تتصرفا بالطريقة نفسها. ولا تكون الخلايا متماثلة؛ لأنّ جزيئات البروتين الطويلة (بناءً على النظرية الحركية)، وDNA، وRNA تصطدم بأشكال مختلفة ليكون تعبير الجينات عندها مختلفًا. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للأجزاء ضعيفة الارتباط بالجزيئات الكبيرة مثل مجموعة الميثيل (CH_3) أن تُطرد بواسطة تصادم معين قوي مع جزيء آخر من المائع الخلوي . لذا، فإنّ الكائنات الحية المنسوخة غير متشابهة حتى وإن كانت حموضها النووية (DNA) متماثلة. وبالفعل، لا يمكن فصل واختيار صفات جينية بحد ذاتها.

* 12-16 آلات نسخ ضوئي وطابعات حاسوبية تستخدم الكهرباء الساكنة

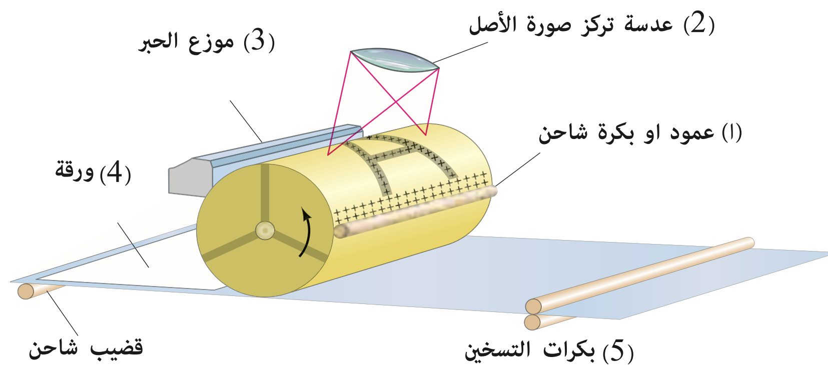
تطبيق الفيزياء
آلات النسخ الضوئي

تستخدم آلة النسخ الضوئي وطابعات الليزر التجاذبَ الكهربائي الساكن لطباعة صورة عن الأصل. وتستخدم كلّ منهما طريقة مختلفة لإسقاط الصورة على أسطوانة خاصّة. ففي الناسخة الضوئية، تركز العدسات والمرايا صورة الورقة الأصلية على الأسطوانة تمامًا، كما تركز عدسة الكاميرا* الصّورة على الغشاء. وعادة ما تصنع الأسطوانة من موصل جيد كالألمنيوم المطلي سطحه بطبقة رقيقة من السيلينيوم الذي يظهر صفة مثيرة (تدعى "الموصلية الضوئية") وهي عدم القدرة على التوصيل الكهربائي في الظلام لتصبح موصلاً فقط عند تعرضها للضوء.

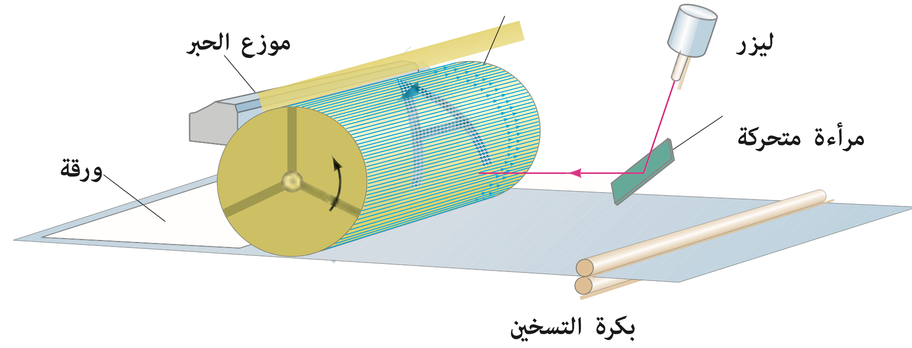
الخطوة الأولى في النسخ الضوئي هي وضع شحنة موجبة منتظمة على طبقة السيلينيوم على الأسطوانة بواسطة دوّار أو عمود مشحون. ويتم عمل هذا في الظلام. وفي الخطوة الثانية، تسقط الصورة المراد نسخها أو طباعتها على الأسطوانة. ولتبسيط الأمور؛ دعنا نفترض أنّ الصورة هي الحرف الداكن A على خلفية بيضاء (كصفحة كتاب) كما هو مبين في (الشكل 16 – 46) ليكون الحرف A على الأسطوانة داكنًا وماحوله فاتح كله. وعند هذه المناطق المضيئة جميعها تصبح طبقة السيلينيوم موصلة لتنساب إليها الإلكترونات من الألمنيوم أسفلها لتعادل كهربائياً هذه المناطق الموجبة.

وأمّا في الخطوة الثالثة فيُعطي مسحوق داكن ناعم يسمى حبرًا شحنة سالبة، ويمسح على الأسطوانة خلال دورانها. وتُجذب جسيمات الحبر سالبة الشحنة إلى المناطق الموجبة للأسطوانة (وهي A في هذه الحالة) لتلتصق هناك فقط. وفي الخطوة الرابعة عندما تستمر الأسطوانة بالدوران، فإنها تضغط وهي تدور على قصاصة ورقية مشحونة بشحنة موجبة أقوى من الشحنات على السيلينيوم. لتنتقل جزيئات الحبر إلى الورقة وتتشكل الصورة النهائية. وفي الخطوة الخامسة الأخيرة، تسخن الورقة لتمكن جزيئات الحبر من الالتصاق الوثيق بالورقة. وتعاد هذه العملية في الناسخات الملونة (أو الطابعات) لكل لون: الأسود، والأزرق المخضر (أزرق) والأحمر الأرجواني (أحمر) والأصفر، ودمج هذه الألوان الأربعة بنسب متفاوتة يولد الألوان الأخرى المرغوب بها جميعها.

* تمّ مناقشة آلات التصوير (الكاميرات) في (البند 25 – 1)، أمّا الصّور الناجّة من العدسات والمرايا فستناقش في (الفصل 23).



الشكل 16 - 46 داخل آلة النسخ الضوئي: (1) أُعطيت أسطوانة السيلينيوم شحنة +. (2) تركز العدسة الصورة على الأسطوانة؛ لتبقى فوق النقاط الداكنة مشحونة. (3) تنجذب جسيمات الحبر (المشحونة سالباً) إلى المناطق الموجبة على الأسطوانة. (4) تنقل الصورة إلى الورقة. (5) تربط الحرارة الصورة بالصفحة.



الشكل 16 - 47 داخل طابعة ليزر: تمسحُ مرآةٌ متحركةٌ شعاعَ ليزرٍ في خطوطٍ أفقيةٍ على امتداد الأسطوانة.

تطبيق الفيزياء
طابعة ليزرية

وفي المقابل، فإنّ طابعة الليزر لا تستخدم "نسخة" ورقيّة كأصل، وبدلًا من ذلك تقبل بمخرجات الحاسوب التي تعمل على التحكم بشدة شعاع الليزر. وهذه العملية مماثلة لما يحدث في الناسخة الضوئية المحتوية على مسحوق حبر وأسطوانة مطلية بمادة السيلينيوم، مع الاختلاف في طريقة تشكّل الصورة على الأسطوانة. يُركّز الشعاع الضوئي الرفيع الناتج من الليزر بواسطة العدسات في نقطة دقيقة. وبمساعدة مرآة متحركة، يمسح الليزر الأسطوانة من إحدى الجهتين إلى الجهة المقابلة في سلسلة خطوط أفقية متتابعة. وخلال مسح الشعاع على امتداد الأسطوانة تتغير شدة الشعاع (بواسطة مخرجات الحاسوب) لتكون شديدة للنقاط البيضاء أو الفاتحة، وضعيفة أو منعدمة للنقاط المراد لها أن تظهر بلون داكن. وبعد المسح لمرة واحدة، فإنّ الأسطوانة تدور بمقدار ضئيل جداً لتبدأ عملية مسح أفقي جديدة أخرى وهكذا (شكل 16 – 47).

وعند دوران الأسطوانة، تتشكّل صورة كاملة عليها. وتصبح الأجزاء المضيئة من السيلينيوم موصلة، وتفقد شحناتها الكهربائية ويلتصق الحبر بالمساحات الداكنة المشحونة كهربائيًا فقط. ومن ثمّ تنقل الأسطوانة الصورة إلى الورقة كما في الناسخة الضوئية.

تطبيق الفيزياء
طابعة حبر نافثة.

أما طابعة نفاث الحبر فلا تستخدم أسطوانة. وبدلًا من ذلك تنفث فوهاتٌ قطراتٍ صغيرة من الحبر مباشرةً على الورقة. وتمسح الفوهات على امتداد الورقة، ويكون كلّ مسح فوق سابقهِ مباشرة كنتيجة لتحرك الورقة إلى الأسفل. وتتكون النقاط على الورقة في كل مسح ما عدا المناطق التي لا يرغب بوجود حبر فوقها مثلما يملي الحاسوب. وتتكون الصورة من عددٍ هائلٍ من النقاط الصغيرة جدًّا . وتُحدّدُ نوعية الطابعة أو درجة وضوحها غالباً بدلالة النقاط لكل بوصة (dpi) في كل اتجاه (خطي).

ملخص

هناك نوعان من **الشحنات الكهربائية**: موجبة وسالبة. ويجب أن تُؤخذ هذه التسميات جبريًا فأي شحنة هي زائد أو ناقص مقدار ما من الكولوم (C) بالوحدات الدولية (SI).

الشحنة الكهربائية **محفوظة**: فإذا تولدت كمية ما من الشحنة خلال عملية ما، فإن مقداراً مساوياً من الشحنة المخالفة سيتولد، وتكون الشحنة الصافية المتولدة مساوية للصفر.

واستنادا إلى النظرية الذرية، فإن الكهرباء تنشأ في الذرة التي تتكون من نواة مشحونة بشحنة موجبة محاطة بإلكترونات مشحونة بشحنات سالبة. ويمتلك كل إلكترون شحنة:

$$-e = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

الموصلات الكهربائية مواد تحتوي على إلكترونات حرّةٍ الحركة نسبيًا، أما **العوازل** الكهربائية فهي مواد تحتوي على عدد قليل من الإلكترونات الحرة.

ويعدّ الجسم مشحونًا بشحنة سالبة عندما يمتلك عددًا زائدًا من الإلكترونات، ومشحونًا بشحنة موجبة عندما يكون عدد إلكتروناته أقل من العدد اللازم لاتزانه كهربائيًا. وتُساوي الشحنة الصافية على أي جسم صفرًا أو عددًا صحيحًا مضروبًا في $+e$ أو $-e$؛ أي أن الشحنة **مكميّة** أو **مكماة**.

ويمكن لجسم ما أن يُشحن بالدلك (لتنتقل الإلكترونات خلال هذه العملية من مادة إلى أخرى) أو بواسطة التوصيل (انتقال الشحنات من جسم مشحون إلى آخر باللمس)، أو الحثّ (فصل الشحنات داخل الجسم بسبب اقتراب جسم مشحون آخر مع عدم حدوث أيّ تلامس).

تؤثر الشحنات بقوة في بعضها بعضًا. وإذا كانت الشحنتان مختلفتين؛ إحداهما موجبة والأخرى سالبة، فإنهما ستؤثران في بعضهما بقوة تجاذب. أمّا إذا كانت الشحنتان متشابهتين فستتنافران مع بعضهما. وتتناسب قيمة القوة التي تؤثر بها شحنة نقطية في أخرى طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1-16)$$

وهذا هو **قانون كولوم**. وتُكتبُ k عادة بدلالة الوحدات الدولية (SI) كالتالي: $1/4\pi\epsilon_0$

ونعتقد بوجود **مجال كهربائي** في الفضاء حول أي شحنة أو مجموعة من الشحنات. ويُقال عندها بأنّ القوة المؤثرة في جسمٍ آخر مشحون هي نتيجة لوجود مجال كهربائي في موضع الجسم المشحون.

ويُعرف **المجال الكهربائي** $\vec{\mathbf{E}}$ عند أي نقطة في الفضاء الناتج عن شحنة أو عن عدّة شحناتٍ بالقوّة لكلّ وحدة شحنات، والتي قد تؤثر في شحنة اختبار موجبة q وضعت عند تلك النقطة :

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{q} \quad (3-16)$$

تُعطى قيمة المجال الكهربائي على بعد r من شحنة نقطية Q كالتالي:

$$E = k\frac{Q}{r^2} \quad (4-16)$$

ويساوي المجال الكهربائي الكلّي عند نقطة ما في الفضاء الجمع الاتجاهي للمجالات المنفردة الناتجة من كل شحنة مساهمة (**مبدأ التراكب**).

وتمثّل المجالات الكهربائية بواسطة **خطوط المجال الكهربائي** التي تبدأ عند الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة. ويُشير اتجاهها إلى اتجاه القوة التي كانت ستؤثر في شحنة اختبار موجبة لو وضعت عند نقطة ما. ويمكن رسم خطوط المجال بحيث يكون عددها لكل وحدة مساحة متناسبًا مع قيمة E.

ينعدم المجال الكهربائي الساكن داخل موصل جيد وتكون خطوط المجال الكهربائي خارج موصل مشحون بالقرب منه مباشرةً عموديةً على سطحه.

[* ويعطى **التدفق الكهربائي** خلال مساحة صغيرة A لمجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ كالتالي:

$$\Phi_E = E_\perp A \quad (7-16)$$

حيث تمثل $E_\perp$ مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على السطح. ويتناسب التدفق خلال سطح ما طرديًّا مع عدد خطوط المجال المارة خلاله].

[* يخبرنا **قانون غاوس** بأن التدفق الكلي المجمع فوق أي سطح مغلق (لأنه مكون من عدد كبير من المساحات الصغيرة ΔA) يساوي الشحنة الصافية Q_{encl} المحصورة بهذا السطح مقسومةً على ϵ_0:

$$\sum_{\text{سطح مغلق}} E_\perp \, \Delta A = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0} \quad (9-16)$$

يمكن استخدام قانون غاوس لتحديد المجال الكهربائي الناتج من توزيع شحني ما ومع هذا، ففائدته محدودة وتنحصر بالحالات التي تظهر توزيع شحنات عالي التماثل. وتكمن الأهمية الحقيقية لقانون غاوس في كونه صيغة عامة وأنيقة عن علاقة الشحنة الكهربائية بالمجال الكهربائي].

[* تؤدي القوة الكهربائية الساكنة خلال تناسخ DNA دورًا أساسيًّا حاسمًا في عملية اختيار الجزيئات المناسبة لانتقال المعلومات الجينية بدقة من جيل إلى آخر].

أسئلة

1. إذا شحنت مشطًا بدلكه بشالٍ حريري، فكيف يمكنك تحديد ما إذا كان المشط قد شحن بشحنة سالبة أم موجبة؟

2. لماذا تلتصق الملابس بأجسامنا في بعض الأوقات بعد إخراجها مباشرةً من آلات تجفيف الملابس؟

3. فسّر لماذا تميل قطرات المطر أو الضباب للتشكل حول الأيونات أو الإلكترونات في الهواء.

4. قُرِّبَ عمودٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ من قصاصاتٍ ورقيةٍ متعادلةٍ فجذبها إليه. ارسم مخططًا، مظهرًا انفصال الشحنات، وفسّر سبب حدوث التجاذب.

5. فسّر لماذا تستطيع مسطرة بلاستيكية دُلكت بقطعة قماشٍ التقاط قصاصات ورق صغيرة؟ ولماذا يصعب حدوث هذا في الأيام عالية الرطوبة؟

6. قارن بين الشحنة الصافية على موصل مع "الشحنات الحرة" داخله؟

7. يبين (الشكلان 16 – 7 و 16 – 8) كيف يمكن لعمود مشحون موضوع بالقرب من جسم فلزي غير مشحون جذب الإلكترونات أو طردها. وبالرغم من وجود عدد كبير من الإلكترونات في الفلز، إلا أن عدداً قليلاً منها يتحرك كما هو مبين. لماذا لا تتحرك جميعها؟

8. عندما يشحن المكشاف الكهربائي تتنافر ورقتاه عن بعضهما وتصنعان زاوية بينهما. ماالذي يوازن قوة التنافر الكهربائية بحيث لا تبتعد الورقتان عن بعضهما أكثر من ذلك؟

9. يشبه شكل قانون كولوم إلى حد كبير قانون نيوتن للجذب الكوني. ما الفروقات بين هاتين القوتين؟ ثم قارن بين كتلة الجاذبية والشحنة الكهربائية.

10. لا نشعر عادةً بقوة الجاذبية أو القوة الكهربائية المتبادلة بين جسمين عاديين. ما السبب في كل حالة؟ أعط مثالين نستطيع التمييز عندهما، وفسّر سبب قدرتنا على ذلك.

11. هل القوة الكهربائية محافظة؟ علل في حالتي الإيجاب أو النفي. (انظر الفصل السادس).

12. عندما تجذب مسطرة مشحونة قصاصات ورق صغيرة بسرعة فقد تقفز قصاصة منها مبتعدة أحياناً بعد ملامستها للمسطرة . فسّر ذلك.

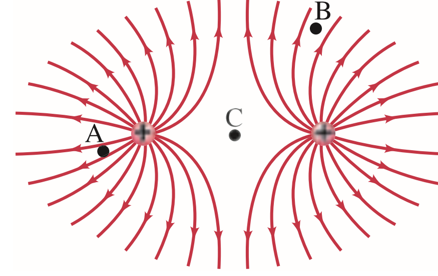
13. فسّر لماذا يجب أن تكون شحنات الاختبار صغيرة عند قياس المجالات الكهربائية.

14. عندما نقيس المجال الكهربائي، هل من الضرورة استخدام شحنة اختبار موجبة، أم من الممكن استخدام شحنة اختبار سالبة؟ فسّر.

15. ارسم خطوط المجال الكهربائي المحيطة بشحنتين كهربائيتين سالبتين تبتعدان مسافة l عن بعضهما.

16. افترض أنّ الشحنتين مختلفتي الإشارة في (الشكل 16 – 31أ) تفصلهما مسافة 12.0 cm. افترض قيمة المجال الكهربائي على بعد 2.5 cm من الشحنة الموجبة . على أي جانب من هذه الشحنة (أعلاها، أم أسفلها، أم على يسارها، أم على يمينها) يُوجد أشدُّ مجال كهربائي وأضعف مجال كهربائي ؟ فسّر.

17. افترض المجال الكهربائي عند النقاط A و B و C في (الشكل 16 – 48). أولًا، ارسم سهمًا عند كلّ نقطة يشير إلى اتجاه محصلة القوى التي ستشعر بها شحنة اختبار موجبة إذا وضعت عند تلك النقطة ثمّ رتب النقاط بدلالة تناقص شدة المجال (الأقوى أولاً).



الشكل **16 - 48**
(السؤال 17).

18. لماذا لا تتقاطع خطوط المجال الكهربائي نهائيًّا؟

19. بين باستخدام النظم الثلاثة لخطوط المجال المعطاة في (البند 16 – 8) أنّ خطوط المجال الكهربائي المبتدئة أو المنتهية عند شحنة نقطية وحيدة يجب أن تتوزع بتماثل حول الشحنة.

20. هل هناك نقطة ما بين الشحنتين Q و $2Q$ (تفصلهما مسافة l) على امتداد الخط الفاصل بينهما حيث $E = 0$ عندما تكون إشارتاهما: (أ) مختلفة. (ب) متشابهة؟ إذا كانت الحل نعم، فأين تقع هذه النقطة بالتقريب؟

21. افترض أنّ شحنة اختبار موجبة صغيرة وُضعت على خط مجال كهربائي عند نقطة ما مثل النقطة P في (الشكل 16 – 13 أ). هل سيكون اتجاه سرعة الشحنة وتسارعها على امتداد هذا الخط؟ فسّر.

22. ارسم خطوط المجال الكهربائي لخط منتظم من الشحنات لانهائي الطول. [تلميح: استخدم التماثل]. هل المجال منتظم في الشدة؟

23*. إذا كان التدفق الكهربائي خلال سطح مغلق صفرًا، فهل من الضروري أن يكون المجال الكهربائي صفرًا عند النقاط جميعها على السطح؟ فسّر. ماذا لو انعكس الأمر: لو أن $\vec{E} = 0$ عند النقاط جميعها على السطح، فهل سيكون التدفق خلال السطح صفراً؟

24*. يحيط سطح غاوس كروي نصف قطره r بشحنة نقطية. فهل Φ_E ستصبح أكبر أم أصغر، أم ستبقى كما هي لو استعملنا مكعبًا طول ضلعه r بدلاً من الكرة؟ فسّر.

مسائل

16 – 5 و 16 – 6 قانون كولوم

[$1\ mC = 10^{-3}\ C$, $1\ \mu C = 10^{-6}\ C$, $1\ nC = 10^{-9}\ C$.]

1. (I) احسب قيمة القوة بين شحنتين نقطيتين $3.60\ \mu C$ يفصل بينهما $9.3\ cm$؟

2. (I) كم إلكترونًا مسؤولًا عن الشحنة $-30.0\ \mu C$؟

3. (I) كم قيمة قوة التجاذب الكهربائية بين نواة الحديد $(q = +26e)$ وإلكترونها الداخلي إذا كانت المسافة الفاصلة بينهما $1.5 \times 10^{-12}\ m$؟

4. (I) كم قوّة التنافر الكهربائية بين بروتونين تفصلهما مسافة $5.0 \times 10^{-15}\ m$ داخل نواة ذرية؟

5. (I) كم القيمة التي تُؤثر بها شحنة $+25\ \mu C$ في شحنة أخرى $+3.0\ mC$ على بعد $35\ cm$ منها؟

6. (II) يؤثّر جسيمًا غبار بقوة $3.2 \times 10^{-2}\ N$ في بعضهما بعضًا. كم ستصبح القوة بينهما عندما يقتربان من بعضهما إلى ثُمُن المسافة الأصلية الفاصل بينهما؟

7. (II) تبتعد كرتان مشحونتان مسافة $8.45\ cm$ عن بعضهما. فإذا أصبحت القوة المتبادلة بينهما ثلاثة أضعاف ما كانت عليه، فكم المسافة الجديدة الفاصلة بينهما الآن؟

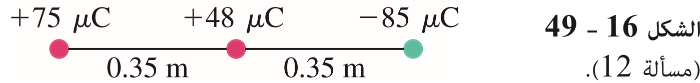
8. (II) يجُرُّ شخصٌ قدميه على سجادة صوفية في يوم جاف، فتتجمع شحنة صافية عليه مقدارها $-42\ \mu C$. فكم عدد الإلكترونات المسؤولة عن هذه الشحنة؟ وكم مقدار الزيادة في وزنه؟

9. (II) ما الشحنة الكلية للإلكترونات جميعها الموجودة في $1.0\ kg$ من الماء (H_2O)؟

10. (II) قارن بين القوة الكهربائية التي تربط الإلكترون في فلكه $(r = 0.53 \times 10^{-10}\ m)$ حول نواة ذرة الهيدروجين المكونة من بروتون واحد مع قوة التجاذب بين الإلكترون والبروتون نفسيهما . وما النسبة بين هاتين القوتين؟

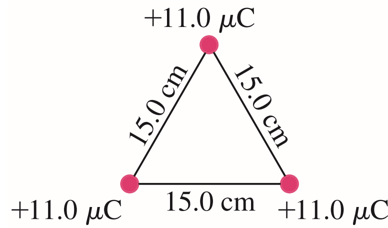
11. (II) ثُبِّتت شحنتان نقطيتان موجبتان على بعد ما من بعضهما. ومجموع شحنتيهما Q_T. ما شحنة كل منهما لجعل القوة الكهربائية بينهما: (أ) أكبر ما يمكن. (ب) أصغر ما يمكن؟

12. وضعت الشحنات $+75$، و $+48$، و $-85\ \mu C$ على خط واحد (شكل 16 – 49). وتبتعد الوسطى مسافة $0.35\ m$ عن كل منهما. احسب محصلة القوى الناتجة على كل شحنة من الشحنتين الأخريين.



الشكل **16 - 49**
(مسألة 12).

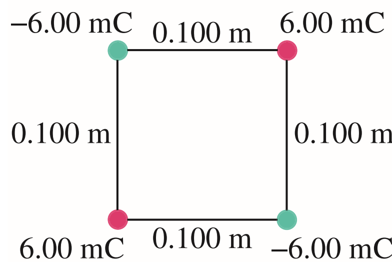
13. (II) وُضع ثلاثة أجسام متساوية الشحنات الموجبة $+11.0\ \mu C$ عند رؤوس زوايا مثلث متساوي الأضلاع (طول ضلعه $15.0\ cm$) (شكل 16 – 50). احسب قيمة محصلة القوى على كل جسم واتجاهها.



الشكل **16 - 50**
(مسألة 13).

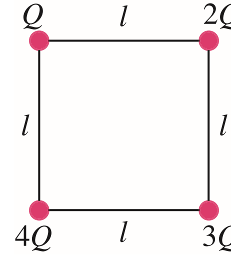
14. (II) وُضِعت شحنة $6.00\ mC$ على الأركان الأربعة جميعها لمربع طول ضلعه $0.100\ m$. حدّد قيمة القوة على كل شحنة واتجاهها.

15. (II) أعد حل (مسألة 14) بعد وضع شحنتين سالبتين لهما القيمة السابقة نفسها مكان شحنتين موجبتين على ركنين متقابلين (شكل 16 – 51).



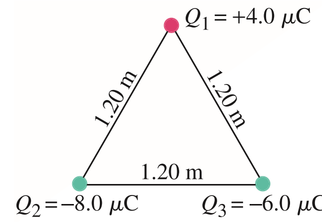
الشكل **16 - 51**
(مسألة 15).

16. (II) وُضِعت الشحنات: Q، و$2Q$، و $3Q$ و $4Q$ على الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه l. (شكل 16 – 52). حدد القوة الناتجة من الشحنات الثلاث الباقية على : (أ) الشحنة $2Q$. (ب) الشحنة $3Q$.



الشكل 16 - 52
(مسألة 16)

17. (II) وُضِعت ثلاثةُ أجسامٍ مشحونةٍ عند رؤوس زوايا مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه 1.20 m (شكل 16 – 35). الشحنات هي: $+4.0\,\mu$C و $-8.0\,\mu$C و$-6.0\,\mu$C. احسب قيمة محصلة القوى الناتجة من الشحنتين الأخريين على كل شحنة واتجاهها.



الشكل 16 - 53
(مسألة 17)

18. (III) تملك شحنتان نقطيتان شحنة كلية مقدارها $560\,\mu$C. إذا كانت القوة التي تؤثر بها كل منهما في الأخرى هي 22.8 N عندما تبتعدان عن بعضهما مسافة 1.10 m . فما شحنة كل منهما؟.

19. (III) شحنتان $-3Q_0$ و $-Q_0$ تفصلهما مسافة l. ويمكن لهاتين الشحنتين التحرك من موضعيهما. ومع هذا فهما لا تتحركان لوجود شحنة ثالثة في الجوار. فما قيمة الشحنة الثالثة؟ وما هو موضعها لتصبح الشحنتان السابقتان في وضع متزن؟

20. (III) وُضعت الشحنتان $+4.75\,\mu$C و $-3.55\,\mu$C على بعد 18.5 cm من بعضهما بعضا. أين يمكن وضع شحنة ثالثة بحيث لا تشعر بمحصلة القوى؟

21. (III) تمتلك كرتان صغيرتان غير موصلتين شحنة كلية مقدارها $90.0\,\mu$C. (أ) عندما تبتعدان مسافة 1.06 m عن بعضهما بعضا تصبح قوة التنافر التي تؤثر بها كل منهما في الأخرى 12.0 N . فما شحنة كل منهما؟ (ب) ماذا يتغير لو أن القوة هي قوة تجاذب؟

22. (III) انتقلت شحنة Q من كرة بلاستيكية غير مشحونة أصلاً إلى كرة أخرى مشابهة تبعد عنها مسافة 12 cm، فأصبحت قوة التجاذب بينهما 17 mN. كم عدد الإلكترونات التي انتقلت من الكرة الأولى إلى الأخرى؟

16 – 7 و 16 – 8 المجال الكهربائي وخطوط المجال

23. (I) ما قيمة القوة الكهربائية واتجاهها على إلكترون في مجال منتظم شدته 2360 N/C يُشير باتجاه الشرق؟

24. (I) تُرك بروتونٌ في مجال كهربائي منتظم، فشعر بقوة كهربائية مقدارها 3.75×10^{-14} N باتجاه الجنوب. فما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه ؟

25. (I) تؤثر قوة مقدارها 8.4 N للأسفل في شحنة مقدارها $-8.8\,\mu$C فما قيمة المجال واتجاهه عند هذه النقطة؟

26. (I) ما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند نقطة 20.0 cm مباشرةً فوق شحنة معزولة مقدارها 33.0×10^{-6} C؟

27. (II) احسب تسارع الإلكترون الناتج من وضعه في مجال كهربائي شدته 750 N/C؟ كيف يعتمد اتجاه التسارع على اتجاه المجال عند تلك النقطة؟

28. (II) ما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند نقطة في منتصف المسافة بين شحنتين $-8.0\,\mu$C و $+7.0\,\mu$C تفصلهما مسافة 8.0 cm؟ افترض عدم وجود أي شحنات أخرى في الجوار.

29. (II) ارسم بالتقريب خطوط المجال الكهربائي حول شحنتين نقطيتين $+Q$ و $-3Q$ تفصلهما مسافة l.

30. (II) ما شدة المجال الكهربائي عند نقطة في الفضاء يشعر عندها بروتون $(m = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg})$ بتسارع مقداره 1 مليون "g's"؟

31. (II) ترك إلكترون ليتسارع من السكون باتجاه الشمال بمعدّل $115\,\text{m/s}^2$ في مجال كهربائي منتظم. فما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه ؟

32. (II) مقدار المجال الكهربائي في منتصف المسافة بين شحنتين متساويتين بالمقدار متعاكستين في الإشارة هو 745 N/C عندما تكون المسافة بينهما 16.0 cm. فما مقدار الشحنة على كل منهما؟

33. (II) احسب مقدار المجال الكهربائي عند مركز مربع طول ضلعه 52.5 cm عندما تحتل شحنة مقدارها $+45.0\,\mu$C إحدى زواياه الأربع. في حين تحتل ثلاث شحنات أخرى قيمة كل منها $-27.0\,\mu$C الزوايا الثلاث الأخرى.

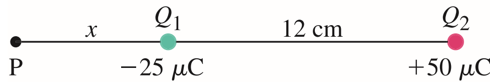
34. (II) احسب مقدار المجال الكهربائي عند إحدى زوايا مربع طول ضلعه 1.00 m إذا احتلت كل زاوية من زواياه الثلاث المتبقية شحنة مقدارها 2.25×10^{-6} C.

35. (II) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P في (الشكل 16 – 54). تفصل المسافة $2a$ الشحنتين عن بعضهما. وتبتعد النقطة P مسافة x عن منتصف المسافة بين الشحنتين. عبر عن إجابتك بدلالة كل من: a ، x ، Q و k.



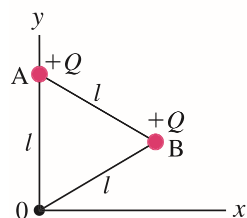
الشكل 16 - 54 (مسألة 35).

36. (II) تبتعد شحنتان $Q_1 = -25\,\mu$C و $Q_2 = +50\,\mu$C مسافة 12 cm عن بعضهما. فما بعد Q_1 عن P إذا كان المجال الكهربائي عند النقطة P (شكل 16 – 55) مساويًا للصفر.



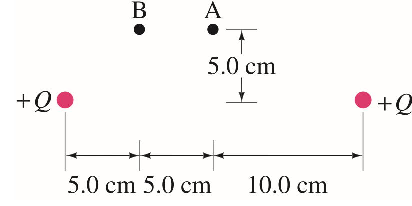
الشكل 16 - 55 (مسألة 36).

37. (II) (أ) حدّد المجال الكهربائي $\vec{E}$ عند نقطة الأصل 0 في (الشكل 16– 56) الناتج عن الشحنتين A و B. (ب) أعد حل مسألة بعد عكس إشارة الشحنة عن النقطة B.



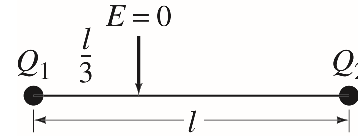
الشكل 16 - 56
(مسألة 37).

38. (II) استخدم قانون كولوم لتحديد قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند النقطتين A و B في (الشكل 16 – 57) والناتج من الشحنتين الموجبتين ($Q = 7.0\,\mu C$) المبينتين. هل تتفق النتائج مع (الشكل 16 – 31 ب)؟



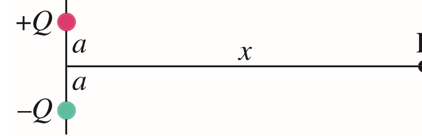
الشكل 16 - 57 (مسألة 38).

39. (II) إذا أُعطيتَ شحنتين نقطيتين مجهولتين Q_1 و Q_2. وكان المجال الكهربائي مساوياً للصفر على امتداد الخط الفاصل بينهما عند ثلث المسافة المتجهة من Q_1 إلى Q_2 (الشكل 16 – 58). فما هي النسبة Q_2/Q_1؟



الشكل 16 - 58 (مسألة 39).

40. (III) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P المبينة في (الشكل 16 – 59). تبتعد الشحنتان مسافة $2a$ عن بعضهما. تقع النقطة P على الخط المتعامد والمنصف للخط الواصل بين الشحنتين على مسافة x من منتصف المسافة بينهما. عبّر عن إجابتك بدلالة كل من a، x، Q و k.

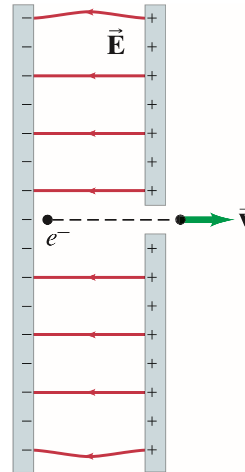


الشكل 16 - 59 (مسألة 40).

41. (III) تسارع إلكترون (كتلته $m = 9.11 \times 10^{-31}\,kg$) في مجال منتظم ($E = 1.45 \times 10^4\,N/C$) $\vec{E}$ بين لوحين متوازيين مشحونين. المسافة الفاصلة بينهما $1.10\,cm$. إذا تسارع الإلكترون من السكون من قرب اللوح السالب الشحنة، ومرّ من خلال ثقب صغير في اللوح الموجب (الشكل 16– 60)

(أ) ما سرعة مروره؟

(ب) أثبت إمكانية إهمال قوة الجاذبية.



الشكل 16 - 60 (مسألة 41)

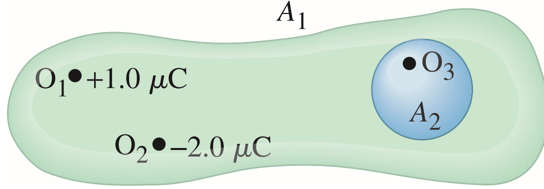
42. (III) يدخل إلكترون يتحرك إلى اليمين بسرعة 1.0% من سرعة الضوء مجالًا كهربائيًا منتظمًا موازيًا لاتجاه تحرك الإلكترون. فإذا توقف الإلكترون عن الحركة خلال مسافة $4.0\,cm$. (أ) ما هو اتجاه المجال الكهربائي؟ (ب) ما شدة المجال؟

*16 – 10 قانون غاوس

***43.** (I) ما الشحنة المحتواة في صندوق مكعب طول أحد أطرافه $28.0\,cm$ إذا كان التدفق الكهربائي الكلّي الخارج منه $1.45 \times 10^3\,N \cdot m^2/C$؟

***44.** (II) وُضعت دائرة مسطحة نصف قطرها $18\,cm$ في مجال كهربائي منتظم قيمته $5.8 \times 10^2\,N/C$. ما التدفق الكهربائي خلال الدائرة عندما يكون سطحها (أ) عمودياً على خطوط المجال. (ب) يصنع 45° مع خطوط المجال . (جـ) موازياً لخطوط المجال.

***45.** (II) يمتلك جسمان O_1 و O_2 في (الشكل 16 – 61) شحنتين $+1.0\,\mu C$ و $-2.0\,\mu C$ على الترتيب. أما الجسم الثالث O_3 فهو متعادل كهربائياً. (أ) ما التدفق الكهربائي خلال السطح A_1 المحتوي على الأجسام الثلاثة؟ (ب) ما التدفق الكهربائي خلال السطح A_2 المحتوي على الجسم الثالث بمفرده؟



الشكل 16 - 61 (مسألة 45).

***46.** (II) وُضع مكعب طول ضلعه l في مجال منتظم $E = 6.50 \times 10^3\,N/C$ وحوافه موازية لخطوط المجال. (أ) ما محصلة التدفق خلال المكعب ككل؟ (ب) ما التدفق خلال كل وجه من وجوهه الستة؟

***47.** (II) المجال الكهربائي بين لوحين فلزيين مربعين $130\,N/C$. فإذا كان طول ضلع كل لوح $1.0\,m$ والمسافة الفاصلة بينهما $3.0\,cm$، فما هي الشحنة على كل لوح (على افتراض أنهما متساويان ومتعاكسان)؟ أهمل تأثير الحواف.

***48.** (II) ما هي الشحنة المستقرة على كرة فلزية نصف قطرها $3.50\text{-}cm$ إذا كان المجال الكهربائي خارجها مباشرة $2.75 \times 10^2\,N/C$؟

***49.** (II) تحمل كرة فلزية صلبة نصف قطرها $3.00\,m$ شحنة كلية $-3.50\,\mu C$. ما قيمة المجال الكهربائي على بعد من منتصف الكرة مقداره:(أ) $0.15\,m$؟ (ب) $2.90\,m$؟ (جـ) $3.10\,m$؟ (د) $6.00\,m$؟ (هـ) كيف ستختلف الإجابات إذا أصبحت الكرة قشرة رقيقة؟

***50.** (III) تركز شحنة نقطية Q في مركز قشرة كروية موصلة وغير مشحونة (انظر شكل 16 – 33). ما المجال الكهربائي E بدلالة r: (أ) عندما تكون r أصغر من نصف القطر الداخلي للقشرة؟ (ب) داخل القشرة؟ (جـ) خارج القشرة؟ (د) هل تؤثر القشرة في المجال الناتج من Q بمفردها؟ هل تؤثر الشحنة Q في القشرة؟

*16 – 11 DNA

***51.** (III) يتماسك النوعان لولبيَّا الشكل لجزيء DNA بواسطة قوى كهربائية ساكنة كما هو مبين في (الشكل 16 – 44). افترض أنّ متوسط الشحنة الصافية (الناتجة من المشاركة الإلكترونية) المشار إليها على ذرتي H و N هي $0.2e$ والمشار إليها على ذرتي C و O هي $0.4e$. افترض أيضاً أن المسافة الفاصلة بين ذرتي كل جزيء هي $1.0 \times 10^{-10}\,m$. حدد القوى المحصلة بين : (أ) ثاليمين و دينايـن. (ب) سايتوسين وجوانين. اعتبر لكل رابطة (نقطة حمراء) فقط ثلاث ذرات على خط (ذرتان على جزيء وذرة على الجزيء الآخر). (جـ) قدر القوة الكلية لجزيء DNA يحتوي على 10^5 زوج من هذه الجزيئات.

مسائل عامة

.52 ما المسافة الفاصلة بين إلكترونين إذا كانت القوة الكهربائية بينهما تساوي وزن أحدهما عند سطح الأرض؟

.53 الشحنة الموجبة لفلس نحاسي كتلته 3.0-g هي $38\ \mu C$. ما نسبة الإلكترونات التي فقدها؟

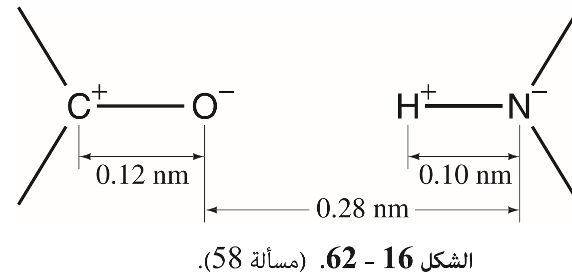
.54 عُلِّقَ بروتونٌ $(m = 1.67 \times 10^{-27}\ kg)$ ساكن في مجال كهربائي منتظم $\vec{E}$. خذ بالحسبان الجاذبية عند سطح الأرض وحدد $\vec{E}$. توحي القياسات بأن هناك مجالا كهربائيًّا يحيط بالأرض. تقارب قيمته 150 N/C عند سطح الأرض، ويشير إلى الداخل باتجاه مركز الأرض.

.55 ما قيمة الشحنة الكهربائية على الأرض؟ وهل هي موجبة أم سالبة؟ [تلميح: المجال الكهربائي خارج كرة مشحونة بشحنة منتظمة هي نفسها كما لو أنّ الشحنة موجودة في المركز].

.56 (أ) إذا كان المجال الكهربائي الموضعي هو 150 N/C، فما التسارع الذي سيشعربه إلكترون قرب سطح الأرض؟ (ب) ما التسارع الذي سيشعر به بروتون قرب سطح الأرض؟ (جـ) احسب نسبة كل تسارع مقارنة بـ $g = 9.8\ m/s^2$.

.57 تبقى قطرة ماء نصف قطرها 0.018 mm ساكنة في الهواء. وإذا كان المجال الكهربائي الموضعي للأرض والمتجه نحو الأسفل هو 150 N/C، فكم عدد الشحنات الإلكترونية الزائدة المحتواة في قطرة الماء؟

.58 قدّر محصلة القوى بين مجموعتي CO و HN المبينتين في (الشكل 16 –62) تحمل شحنتا C و O تساوي $\pm 0.40e$. وشحنتا H و N تساوي $\pm 0.20e$ حيث $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$. [تلميح: لا تضمّ القوى "الداخلية" بين C و O أو بين H و N].



الشكل 16 - **62**. (مسألة 58).

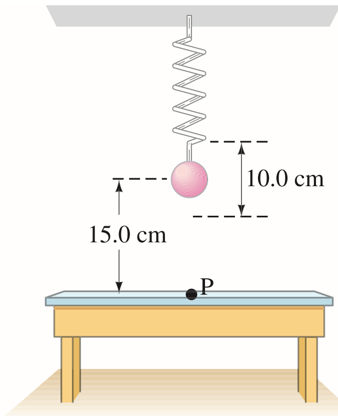
.59 يدور إلكترون في مدار دائري حول بروتون بسرعة $1.1 \times 10^6\ m/s$ في النموذج البسيط لذرة الهيدروجين. حدد نصف قطر مدار الإلكترون . [تلميح : انظر الفصل الخامس عن الحركة الدائرة].

.60 يافترض أن التجاذب الكهربائي، وليس الجاذبية، هو المسؤول عن بقاء القمر في مداره حول الأرض. إذا وضعت شحنتان متساويتان بالمقدار ومتعاكستان بالإشارة على الأرض والقمر، فما مقدار Q الضروري للإبقاء على المدار الحالي؟ استخدم القراءات التالية : كتلة الأرض $= 5.98 \times 10^{24}\ kg$، وكتلة القمر $= 7.35 \times 10^{22}\ kg$، ونصف قطر المدار $= 3.84 \times 10^8\ m$. تعامل مع الأرض والقمر وكأنهما جسمان نقطيان.

.61 تحرك إلكترون بسرعة $v_0 = 21.5 \times 10^6\ m/s$ موازياً لمجال كهربائي قيمته $E = 11.4 \times 10^3\ N/C$. (أ) ما المسافة التي سيقطعها الإلكترون قبل أن يتوقف؟ (ب) ما الزمن المستغرق قبل أن يعود إلى نقطة البداية؟

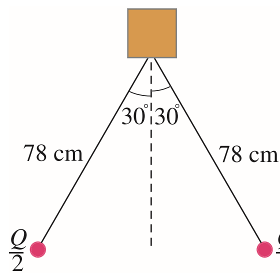
.62 ثُبّتت شحنة موجبة نقطية $Q_1 = 2.5 \times 10^{-5}\ C$ عند نقطة المرجع للمحاور، وثُبتت شحنة سالبة $Q_2 = -5.0 \times 10^{-6}\ C$ على المحور السيني (x) عند $x = +2.0\ m$. أوجد مكان (أو أماكن) انعدام المجال الكهربائي على المحور السيني (x) الناتج من هاتين الشحنتين.

.63 وُضعت كرة رصاصية صغيرة داخل عازل بلاستيكي وعلقت رأسيًّا من زمبرك مثل $(k = 126\ N/m)$ فوق طاولة مختبر (شكل 16 – 63). الكتلة الكلية للكرة المطلية هو 0.800 kg . ويقع مركزها على ارتفاع 15.0 cm فوق سطح الطاولة وهي في وضعية الاتزان. سُحبت الكرة نحو الأسفل 5.00 cm أسفل وضعية الاتزان ثم رُسّبت عليها شحنة كهربائية $Q = -3.00 \times 10^{-6}\ C$ ثم تُركت. باستخدام ما تعرفه عن الاهتزاز التوافقي، اكتب معادلة لشدة المجال الكهربائي بدلالة الزمن يمكن قياسها عند نقطة (P) فوق سطح الطاولة أسفل الكرة مباشرةً.



الشكل 16 - **63**
(مسألة 63).

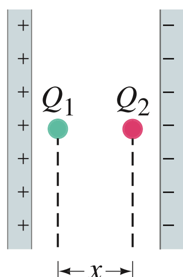
.64 صُنع مكشاف كهربائي كبير باستخدام ورقتين طول كل منهما 78 cm وربطت في نهايتيهما كرتان صغيرتان كتلة كلّ منهما 24 g لتستقر معظم الشحنات على الكرتين في حالة شحن المكشاف. إذا صنعت كل ورقة زاوية مقدارها $30°$ مع الرأسي، فما الشحنة الكلية Q التي تأثر بها المكشاف الكهربائي؟ أهمل كتلة الورقتين.



الشكل 16 - **64**
(مسألة 64).

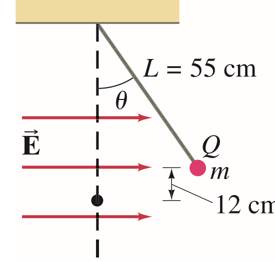
.65 سينهار الهواء الجاف ويولد شرارة عندما يزداد المجال الكهربائي عن حوالي $3 \times 10^6\ N/C$. ما مقدار الشحنة التي يمكن أن تتراكم على حبة بازلاء خضراء (قطرها 0.75 cm) قبل أن تفرغ شحناتها تلقائياً؟ [تلميح: تصلح (المعادلتان 16 – 4 أ ، ب) خارج كرة عند قياس r من مركزها].

.65 توضع شحنتان نقطيتان $Q_1 = -6.7\ \mu C$ و $Q_2 = 1.8\ \mu C$ بين لوحين متوازيين مشحونين بشحنتين مختلفتين كما هو مبين في (الشكل 16 – 65). ويفصل بين الشحنتين مسافة $x = 0.34\ m$. افرض أن المجال الكهربائي المولد بواسطة اللوحين منتظم ويساوي $E = 73{,}000\ N/C$. احسب محصلة القوى الكهربائية الساكنة على Q_1، وحدّد اتجاهها.



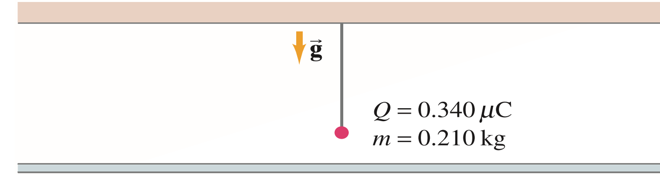
الشكل 16 - **65**
(مسألة 66).

67. تمّ ملاحظة أنّ الشحنة النقطية $(m = 1.0\ \text{g})$ الموجودة عند نهاية حبل عازل طوله $55\ \text{cm}$ تكون في وضع الاتزان في مجال كهربائي منتظم مقداره $12{,}000\ \text{N/C}$ عندما يكون موضع البندول كما هو مبيّن في (الشكل 16 – 66). وعندما تكون الشحنة على ارتفاع $12\ \text{cm}$ فوق أخفض موضع (رأسيًا). حدّدْ قيمة الشحنة النقطية وإشارتها عندما يشير المجال إلى اليمين في (الشكل 16 – 66).



الشكل **16 - 66** (مسألة 67).

68. تعلق شحنة نقطية كتلتها $0.210\ \text{kg}$ ومحصلة شحنتها $+0.340\ \mu\text{C}$ ساكنة عند نهاية حبل عازل فوق ورقة كبيرة مشحونة. وتصنع الورقة الأفقية المشحونة بانتظام مجالاً كهربائيًا رأسيًا منتظمًا في جوار الشحنة النقطية. وقيس الشدّ في الحبل فوجد أنه $5.67\ \text{N}$. وقد وجد أن الشدّ في الحبل يساوي $5.67\ \text{N}$. احسب قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة الورقة واتجاهه (شكل 16 – 67).

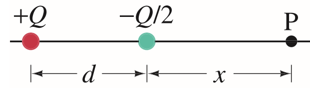


الشكل **16 - 67** (مسألة 68).

69. ما الشحنة الكلية للإلكترونات جميعها في عمود ألمنيوم كتلته $15\ \text{kg}$؟ وما الشحنة الكلية للعمود؟ (هناك 13 إلكترونًا في كلّ ذرّةِ ألمنيوم ذات وزن ذري $27\ \text{u}$).

70. تفصل مسافة R بين كرتين صغيرتين موصولتين ومتشابهتين A و B، وتحمل كلّ منهما شحنة صغيرة Q. (أ) ما القوة التي تؤثر بها الكرة B في الكرة A؟ (ب) إذا لامست كرة مشابهة وغير مشحونة الكرة C الكرة B ثم أزيحت بعد ذلك إلى مكان بعيد. فما محصلة القوة التي ستؤثر الآن في الكرة A؟ (جـ) إذا لامست الكرة C الآن الكرة A ثم أزيحت إلى مكان بعيد. فما القوة التي ستؤثر في الكرة A في هذه الحالة ؟

71. إذا أعطيت الشحنتين المبينتين في (الشكل 16 – 68). فما الموضع (المواضع) x الذي سيجعل المجال الكهربائي صفراً؟ هل يمكن للمجال أن يكون صفراً عند أي نقطة (أو نقاط) أخرى ليست على المحور السيني (x)؟



الشكل **16 - 68**. (مسألة 71).

72. وُضعت شحنتان $+Q$ و $-Q$ كتلة كل منهما m عند نهايتي عمود مهمل الكتلة طوله L، ومثبّت من منتصفه بواسطة دبوس فوق سطح طاولة. أوجد محصلة عزم القوى على النظام المكون من العمود والشحنات عندما يتأثر النظام بمجال كهربائي منتظم موازٍ للطاولة وعمودي على العمود.

73. وُضعت أربع شحنات نقطية موجبة ومتساوية، مقدار كلٍّ منها $8.0\ \mu\text{C}$ على الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه $9.2\ \text{cm}$. ما الشحنة اللازم وضعها في مركز المربع لتصبح الشحنات جميعها في وضع الاتزان؟ هل هذا الاتزان مستقر أم غير مستقر (بند 9 – 4)؟

إجابات التمارين

أ: العكس.

ب: $5\ \text{N}$.

جـ: $1.2\ \text{N}$ إلى اليمين.

د : $0.32\ \text{m}$.

هـ : (أ) لا. (ب) نعم، في منتصف المسافة بينهما.

و : $9.0 \times 10^4\ \text{N/C}$ رأسياً نحو الأسفل.

ز : (أ) $\vec{\mathbf{E}}_1$ يمين . و $\vec{\mathbf{E}}_2$ يسار. $\vec{\mathbf{E}}$ يمين.
(ب) $\vec{\mathbf{E}}_1$ يسار . و$\vec{\mathbf{E}}_2$ يمين. $\vec{\mathbf{E}}$ يمين.

ح : $\sum E_{\perp}\, \Delta A = E \sum \Delta A = E(2\pi r L) = \dfrac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$

وعليه، فإن $E = \dfrac{1}{2\pi\epsilon_0 r}\dfrac{Q}{L}$.



يمكن تخزين مقدار هائل من طاقة الوضع الكهربائية في الغيوم. ويمكن أن تصل الفولتية (= فرق الجهد = ΔPE لكلّ شحنة) بين الغيوم والأرض عند حدوث البرق إلى مئة مليون فولت. ويرتبط المجال الكهربائي بفرق الجهد لكلّ وحدة طول. وإذا ارتفعت قيمته إلى درجة كافية داخل الغيوم، فإن الإلكترونات ستكتسب طاقة حركة كبيرة KE كافية كي تفقد الذرات إلكتروناتها، فيصبح الهواء موصلاً نتيجة الانسياب السريع للإلكترونات المحررة والذرات المؤينة التي ستصطدم مع ذرات أخرى مسببة تأيّنًا إضافيًّا. ويُسبب هذا الانسياب الهائل للشحنات في تقليل فرق الجهد فيتوقف التفريغ. وتعود الإلكترونات والذرات بالإتحاد لتكوين ذرات مرةً أخرى. أمّا الضوء الذي نراه فهو ناتج من عودة الإلكترونات إلى مستويات الطاقة المنخفضة داخل الذرات. وسنتناول في هذا الفصل الفولتية وعلاقتها بالمجال الكهربائي، والطاقة الكهربائية المختزنة، والمكثفات، والتطبيقات مثل أنبوب الأشعة المهبطية ECG.

الفصل 17

الجهد الكهربائي

لقد رأينا في الفصل السادس مدى أهميّة مبدأ الطاقة وخصوصًا عند التعامل مع موضوع الميكانيكا. فمن جهة أولى، ونتيجة لاعتبار الطاقة كمية محفوظة، فهي أداة مهمة لفهم الطبيعة. وكذلك رأينا كيف يمكن حل مسائل كثيرة باستخدام مبدأ الطاقة بالرغم من عدم توافر تفاصيل دقيقة عن القوى المسؤولة، أو عندما تكون الحسابات صعبة جدًّا باستخدام قوانين نيوتن.

ويمكن استخدام وجهة نظر الطاقة في التعامل مع الكهرباء لأنّها مفيدةٌ بشكل خاص؛ فهي لا توسع استخدام قانون حفظ الطاقة فحسب، بل تمنحنا طريقة أخرى للنظر إلى الظواهر الكهربائية. وتُعدّ الطاقة أيضًا في كثير من الحالات أداة لحل المشاكل بسهولةٍ ويسرٍ بشكل أكبر مقارنة مع استخدام القوى والمجالات الكهربائية.

1-17 طاقة الوضع الكهربائية وفرق الجهد

طاقة الوضع الكهربائية

لكي نستطيع تطبيق حفظ الطاقة، فإنّنا نحتاج إلى تعريف طاقة الوضع الكهربائية كما في الأنواع الأخرى من طاقة الوضع. وكما رأينا في الفصل السادس، يمكننا تعريف طاقة الوضع للقوة المحافظة فقط. إن الشغل المبذول بواسطة قوة محافظة لنقل جسم بين موضعين لا يعتمد على المسار المتبع. كما أن قوةَ تجاذب الكهرباء الساكنة المتبادلة بين الأجسام المشحونة (معادلة 16 – 1، $F = kQ_1Q_2/r^2$) أو تنافرها محافظةٌ لاعتمادها على الموضع فقط تمامًا مثل قوة الجاذبية المحافظة أيضاً. وعليه، يمكننا تعريف طاقة الوضع PE للقوة الكهروستاتيكية.

لقد رأينا في الفصل السادس أنّ التغيّر في طاقة الوضع بين نقطتين أ و ب يساوي الشغل السالب المبذول من القوة المحافظة لنقل الجسم من "أ" إلى "ب" : $\Delta PE = -W$.

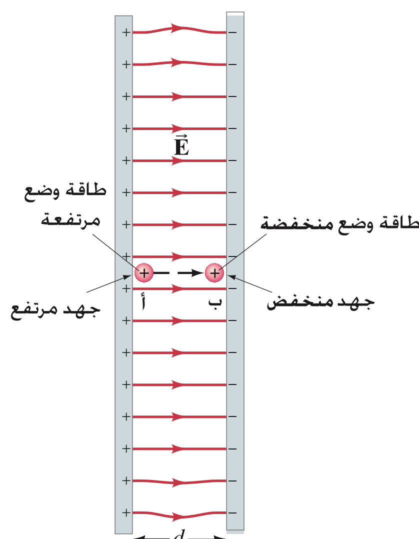
لذا، فإنّنا نُعرّف التغير في طاقة الوضع الكهربائية أو الجهد الكهربائي $PE_b - PE_a$ عندما تتحرك شحنة نقطية q من نقطة ما "أ" إلى نقطة أخرى "ب" بالشغل السالب المبذول بواسطة القوة الكهربائية لنقل الشحنة من "أ" إلى "ب". وعلى سبيل المثال، خذ بالحسبان المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين مشحونين بشحنتين متساويتين بالمقدار ومتعاكستين بالإشارة. ولنفترض أن المسافة الفاصلة بينهما صغيرة مقارنة مع أبعادهما من عرض وارتفاع. مما ينتج من ذلك مجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ فوق معظم المنطقة الفاصلة بينهما (شكل $17 - 1$). والآن خذ بالحسبان شحنة موجبة نقطية صغيرة q وُضعت عند نقطة قريبة جدًا من اللوح الموجب كما هو مبين. وهذه الشحنة q صغيرة لدرجة أنّها لن تؤثر في $\vec{\mathbf{E}}$. فإذا تُركت هذه الشحنة حرّة الحركة، فإنّ القوة الكهربائية F ستقوم ببذل شغل عليها وتسريعها باتجاه اللوح السالب. ويُعطى الشغل المبذول W بواسطة المجال الكهربائي E لنقل الشحنة مسافة d كالتالي:

$$W = Fd = qEd$$

حيث استخدمنا (المعادلة $16 - 5$): $F = qE$. ويساوي التغير في الجهد الكهربائي الشغل السالب المبذول بواسطة القوة الكهربائية:

$$PE_b - PE_a = -qEd \qquad (17 - 1)\ [\vec{\mathbf{E}}\ \text{منتظم}]$$

لهذه الحالة من المجال الكهربائي المنتظم $\vec{\mathbf{E}}$. وفي الحالة المبينة في الشكل، فإنّ طاقة الوضع تقل (ΔPE سالبة). وكلما تسارع الجسم المشحون من النقطة "أ" إلى النقطة "ب" في (شكل $17 - 1$) ازدادت طاقة الجسم الحركية KE بمقدار متساوٍ. وبالنسبة إلى حفظ الطاقة، فإنّ الطاقة قد تحولت من طاقة وضع كهربائية إلى طاقة حركية مع بقاء الطاقة الكلية محفوظة. لاحظ أنّ أكبر قيمة للجهد الكهربائي للشحنة الموجبة q تحصل عندما تكون النقطة "أ" قرب اللوح الموجب.* والعكس صحيح لشحنة سالبة، حيث يكون أكبر قيمة لجهدها الكهربائي عندما تكون بالقرب من اللوح السالب.



الشكل 17 – 1 يُبذل الشغل بواسطة المجال الكهربائي لنقل شحنة موجبة من الموضع أ إلى الموضع ب.

الجهد الكهربائي وفرق الجهد

لقد وجدنا في الفصل السادس عشر أنّه من المفيد تعريف المجال الكهربائي على أنه القوة المؤثرة في كل وحدة شحنة. وبالمثل من المفيد أيضا تعريف **الجهد الكهربائي** (أو ببساطة الجهد عندما تكون "الكهرباء" مفهومة ضمنيًا) على أنه طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنات. وأُعطي الجهد الكهربائي الرمز V. وإذا امتلكت شحنة اختبار موجبة q طاقة وضع كهربائية PE_a عند نقطة ما أ (مقارنةً بطاقة وضع صفرية) فإن الجهد الكهربائي V_a عند تلك النقطة هو:

الجهد: هو طاقة الوضع لكل وحدة شحنات.

$$V_a = \frac{PE_a}{q} \qquad (17 - 2\ \text{أ})$$

وكما ناقشنا في الفصل السادس عشر أيضا، فإنّ الفروق في طاقة الوضع فقط هي التي لها معنى فيزيائي مادي. لذلك، يمكن قياس **"الاختلاف في الجهد"** فقط أو "فرق الجهد" بين النقطتين "أ" و "ب" (كالفرق بين النقطتين "أ" و "ب" في الشكل $17 - 1$). وعندما تبذل قوة كهربائية شغلًا موجبًا على شحنة ما، فإن طاقتها الحركية ستزداد، أما طاقة وضعها فستقل. ويعادل الفرق في طاقة الوضع $PE_b - PE_a$ الشغل السالب W_{ba} المبذول بواسطة المجال الكهربائي لنقل الشحنة من "أ" إلى "ب". لذا، فإن فرق الجهد V_{ba} هو:

فرق الجهد

$$V_{ba} = V_b - V_a = \frac{PE_b - PE_a}{q} = -\frac{W_{ba}}{q} \qquad (17 - 2\ \text{ب})$$

لاحظ أنّ الجهد الكهربائي كالمجال الكهربائي في عدم اعتماده على شحنة الاختبار q. ويعتمد V على الشحنات الأخرى التي صنعت المجال وليس على الشحنة q. وتحصل q على طاقة وضع عند وجودها في منطقة الجهد V الناتج من الشحنات الأخرى. ونرى من خلال تعريفنا أنّ اللوح الموجب في (الشكل $17 - 1$) هو عند جهد مرتفع مقارنة مع اللوح السالب. وعليه، فإنّ الجسم موجب الشحنة سيتحرك تلقائيًا من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض. وستقوم الشحنة السالبة بعمل العكس.

* ستمتلك الشحنة عند هذه النقطة القابلية العظمى لبذل الشغل (على بعض الأجسام أو الأنظمة الأخرى).

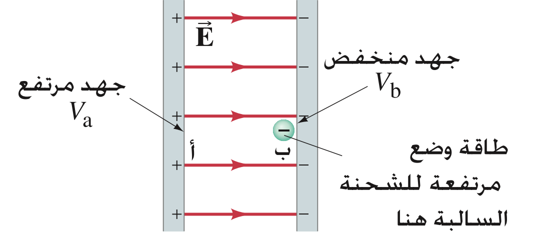
إنّ وحدة الجهد الكهربائي وفرق الجهد هي الجول/كولوم. وقد أُعطيت اسمًا خاصًّا وهو الفولت تشريفًا لمخترع البطارية الكهربائية **فولتا** (1745 – 1827). وتمّ اختصار الفولت بالرمز V أي أنّ $1\,V = 1\,J/C$. وبما أنّ فرق الجهد يقاس بدلالة الفولت، فقد أصبح يشار إليه بـ **الفولتية**.

وحدة فرق الجهد: الفولت $(1\,V = 1\,J/C)$

الفولتية = فرق الجهد

وإذا أردنا أن نتكلّم عن الجهد V_a عند نقطة ما "أ"، فيجب أن نكون على درايةٍ بأنّ V_a ستعتمد على موضع اختيارنا للجهد الصفري. ويمكن اختيار جهد كهربائي يساوي صفرًا بطريقة عشوائية عند دراسة حالة ما تمامًا مثل طاقة الوضع؛ لأنّه لا يمكن قياس إلاّ الفرق في طاقة الوضع. وغالبًا ما تُؤخذ الأرض (أو أيّ موصل تمّ إيصاله بالأرض مباشرة) على أنّها عند جهد كهربائي يساوي صفرا. وتعطى الجهود الأخرى مقارنة بالأرض. (إذن، فالنقطة ذات الجهد 50 V هي نقطة فرق الجهد بينها وبين الأرض يعادل 50 V). . ويمكن أن نقوم باختيار الجهد الصفري عند بعد لانهائي $(r = \infty)$ في حالات أخرى كما سنرى لاحقاً.

يتم اختيار $V = 0$ عشوائياً



الشكل 17 - 2 يظهر الجزء المركزي (للشكل 17 - 1) شحنة نقطية سالبة قرب اللوح السالب. (مثال مفاهيمي 17 - 1).

المثال مفاهيمي 17-1 **شحنة سالبة.**

افترض أنّ شحنةً سالبةً كشحنةِ الإلكترون وُضعت قرب اللوح السالب في (الشكل 17 – 1) عند النقطة "ب" المبينة في (الشكل 17 – 2). إذا كان الإلكترون حرّ الحركة، فهل ستزداد طاقة وضعه الكهربائية أم ستقل ؟ وكيف سيتغير جهده الكهربائي؟

الإجابة: سيتحرك الإلكترون إذا تُرك حرّا عند النقطة "ب" باتجاه اللوح الموجب، وكلما اقترب الإلكترون من اللوح الموجب قلت طاقة وضعه، وأصبحت طاقته الحركية أكبر. ومع هذا، فعليك أن تتذكر دائما أنّ الإلكترون يتحرك من النقطة "ب" ذات الجهد المنخفض إلى النقطة "أ" ذات الجهد المرتفع: $\Delta V = V_a - V_b > 0$. (ينتج الجهدان V_a و V_b من الشحنات الموجودة على اللوحين، وغير ناجمين من الإلكترون).

ملحوظة: لن تتسارع الشحنة الموجبة الموضوعة قرب اللوح السالب عند النقطة "ب". وتميل الشحنة الموجبة إلى الحركة من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض.

تنويه:

تمتلك الشحنة السالبة PE مرتفعة عندما يكون الجهد V منخفضاً.

وبسبب تعريف فرق الجهد الكهربائي على أنّه الفرق في الطاقة الكهربائية لكلّ وحدة شحنات، فإنّ التغير في طاقة الوضع لشحنة ما q عند نقلها بين النقطتين "أ" و "ب" هي:

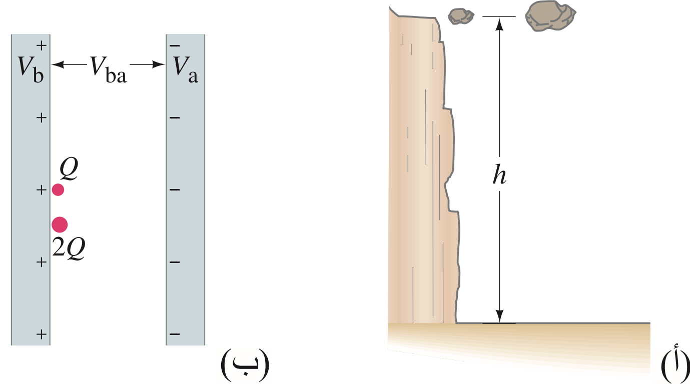
الجهد الكهربائي وطاقة الوضع.

$$\mathrm{PE_b} - \mathrm{PE_a} = q(V_b - V_a) = qV_{ba} \qquad (3 - 17)$$

أي أنّه إذا تحرك جسم شحنته q خلال فرق جهد V_{ba}، فإنّ طاقة وضعه ستتغير بمقدار qV_{ba}. وعلى سبيل المثال، إذا كان فرق الجهد بين اللوحين في (الشكل 17 – 1) هو 6 V، فإنّ شحنة مقدارها +1 C تتحرك (ولنقل بواسطة قوة خارجية) من "ب" إلى "أ" ستكتسب طاقة وضع كهربائية تعادل $(1\,C)(6\,V) = 6\,J$. (وسوف تخسر 6 جول من طاقة وضعها الكهربائية إذا تحركت من "أ" إلى "ب"). وبالمثل، فإنّ شحنة مقدارها +2 C ستكتسب 12 J وهكذا دواليك. وعليه، فإنّ فرق الجهد الكهربائي هو مقياس مدى مقدرة شحنة كهربائية في الحصول على طاقة خلال وضع ما. وبما أنّ الطاقة هي القدرة على بذل الشغل، فإنّ فرق الجهد الكهربائي هو أيضاً مقياس لمقدار الشغل الذي تستطيع أن تبذله شحنة ما. وتعتمد قيمته تحديدًا على كل من فرق الجهد والشحنة. ولكي نفهم فرق الجهد بصورة أوضح.

دعنا نقارن مع حالة الجاذبية عند سقوط حجر من أعلى جرف؛ فكلما ازداد ارتفاع الجرف h ازدادت قيمة طاقة الوضع $(= mgh)$ التي يمتلكها الحجر عند قمة الجرف بالنسبة إلى قاعه، وازدادت كذلك قيمة الطاقة الحركية التي سيمتلكها عندما يصل إلى القاع. وستعتمد قيمة طاقته الحركية الفعلية التي سيكتسبها، والشغل القادر على بذله على كل من ارتفاع الجرف وكتلة الحجر m. ويمتلك حجران أحدهما صغير والآخر كبير موجودان عند الارتفاع h نفسه جهد الجاذبية نفسه. ومع هذا، فإن الحجر الكبير سيمتلك طاقة وضع أكبر (لأنه يمتلك كتلة أكبر). وتتشابه في ذلك الحالة الكهربائية (شكل 17 – 3 ب): يعتمد التغير في طاقة الوضع أو الشغل الممكن بذله على كلّ من فرق الجهد (مقارنةً مع ارتفاع الجرف) والشحنة (مقارنة مع الكتلة). (معادلة 17 – 3). ومع هذا، لاحظ الاختلاف المهم الآتي: تظهر الشحنة الكهربائية في نوعين موجب وسالب، أما كتلة الجاذبية فهي موجبة دائمًا.

يرتبط الجهد بارتفاع الجرف



الشكل 17 - 3 (أ) حجران عند الارتفاع نفسه. يمتلك الحجر الأكبر طاقة وضع أكبر. (ب) تمتلك شحنتان الجهد الكهربائي نفسه. وتمتلك الشحنة $2Q$ طاقة وضع أكبر.

يفترض أن تحافظ مصادر الطاقة الكهربائية كالبطاريات ومولدات الكهرباء على فرق الجهد. وتعتمد قيمة الطاقة الحقيقية المحوّلة بواسطة جهاز من هذا النوع على مقدار انسياب الشحنة. وعلى فرق الجهد أيضا (معادلة 17 − 3). وعلى سبيل المثال. افترض مصباح إنارة سيارة موصول ببطارية 12.0-V ، حيث يتناسب مقدار الطاقة المتحولة إلى ضوء وطاقة حرارية طردياً مع مقدار انسياب الشحنة التي تعتمد على المدة الزمنية لإنارة المصباح. فإذا انسابت شحنة مقدارها 5.0 C خلال المصباح لفترة من الزمن، فإن الطاقة الكلية المتحولة هي $(5.0\ \text{C})(12.0\ \text{V}) = 60\ \text{J}$. ولكن إذا تُركَ مصباحُ السيارة مضيئا ضعف الفترة الزمنية السابقة، فإن 10.0 C من الشحنة سينساب. وستصبح الطاقة المحُوّلة $(10.0\ \text{C})(12.0\ \text{V}) = 120\ \text{J}$.

ويقدّم (الجدول 17 − 1) بعض فروق الجهد النمطية.

الجدول 17-1 بعض فروق الجهد العادية

المصدر	الفولتية (تقريبا)
بين سحابة رعدية و الأرض	10^8 V
خط طاقة بجهد عالي	10^5–10^6 V
تزويد الأنبوب القاذف للألكترونات للتلفاز	10^4 V
شعلة أو شرارة الأشعال في السيارة	10^4 V
الأجهزة المنزلية	10^2 V
بطارية السيارة	12 V
بطارية المصباح	1.5 V
جهد الراحة على الغشاء العصبي	10^{-1} V
تغير الجهد على الجلد	10^{-4} V

المثال 17-2 إلكترون في أنبوب تلفاز.

افترض أنّه تمّ تسريع إلكترون في أنبوب تلفاز من السكون خلال فرق جهد $V_{ba} = V_b - V_a = +5000\ \text{V}$ (شكل 17 − 4). (أ) ما التغير في طاقة الوضع الكهربائية للإلكترون؟ (ب) ما سرعة الإلكترون $(m = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})$ نتيجة لهذا التسارع؟

النهج: ستتناقص طاقة وضع الإلكترون الكهربائية نتيجة تسارعه باتجاه اللوح الموجب بمقدار $\Delta \text{PE} = qV_{ba}$ (معادلة 17 − 3). وسيعادل النقصُ في طاقة الوضع الزيادةَ في الطاقة الحركية (حفظ الطاقة).

الحل: (أ) الشحنة على الإلكترون: $q = -e = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$. وعليه، فإنّ التغير في طاقة الوضع هو:

$$\Delta \text{PE} = qV_{ba} = (-1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(+5000\ \text{V}) = -8.0 \times 10^{-16}\ \text{J}$$

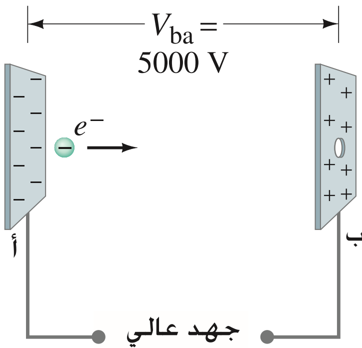
وتوحي الإشارة السالبة بنقصان طاقة الوضع. ولكن إشارة فرق الجهد V_{ba} موجبة لأنّ الجهد النهائي V_b أكبر من الجهد الابتدائي V_a إضافةً إلى انجذاب الإلكترونات إلى اللوح الموجب وطردها بعيدًا عن اللوح السالب. (ب) إنّ طاقة الوضع المفقودة بواسطة الإلكترونات قد تحولت إلى طاقة حركية له. ومن حفظ الطاقة (معادلة 6 − 11 أ): $\Delta \text{KE} + \Delta \text{PE} = 0$:

$$\Delta \text{KE} = -\Delta \text{PE}$$
$$\tfrac{1}{2}mv^2 - 0 = -q(V_b - V_a) = -qV_{ba}$$

حيث تساوي طاقة الحركية الابتدائية صفرًا ليبدأ الإلكترون حركته من السكون. ولإيجاد v:

$$v = \sqrt{-\frac{2qV_{ba}}{m}} = \sqrt{-\frac{2(-1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(5000\ \text{V})}{9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg}}} = 4.2 \times 10^7\ \text{m/s}$$

ملحوظة: تعتمد طاقة الوضع على الشحنة والفولتية فقط لا على الكتلة. في حين تعتمد السرعة على الكتلة.



الشكل 17 - 4 إلكترون مسرع في أنبوب تلفاز. (مثال 17 - 2).

تمرين أ: افترض أنّه تمّ تسريع بروتون $(m = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})$ من السكون إلى فرق جهد $V_{ba} = -5000\ \text{V}$ في (المثال 17 − 2) بدلاً من الإلكترون. (أ) ما التغير في PE للبروتون؟ (ب) ما سرعته النهائية؟

2-17 العلاقة بين الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي

يمكن وصف تأثير أيّ توزيع للشحنات بدلالة المجال الكهربائي أو بدلالة الجهد الكهربائي. وغالبًا ما يكون استخدام الجهد الكهربائي أسهل لأنّه كمية قياسية مقارنة بالمجال الكهربائي (كمية متجهة). وهناك علاقة وطيدة بين الجهد والمجال. ولنأخذ بالحسبان مجالًا كهربائيًا منتظمًا كالذي بين اللوحين المتوازيين في (الشكل 17 − 1) حيث فرق الجهد بينهما V_{ba}. والشغل المبذول بواسطة المجال الكهربائي - لنقل شحنة موجبة q من "أ" إلى "ب" - يساوي سالب التغير في طاقة الوضع (معادلة 17 − 2 ب) حيث:

$$W = -q(V_b - V_a) = -qV_{ba}$$

ونستطيع أيضًا التعبير عن الشغل المبذول بدلالة حاصل ضرب القوة في المسافة؛ حيث القوة على q هي $F = qE$ أي أنّ:

$$W = Fd = qEd$$

حيث تمثل d المسافة (الموازية لخطوط المجال) بين النقطتين "أ" و "ب". ونساوي الآن بين هذين التعبيرين للشغل W لنجد أنّ $qV_{ba} = -qEd$ أو:

علاقة V بالمجال المنتظم

$$V_{ba} = -Ed \qquad [E \text{ منتظم}] \quad \textbf{(17 − 4 أ)}$$

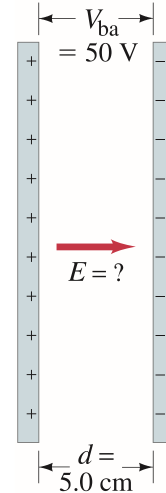
وعندما نحل لإيجاد E. فسنحصل على:

$$E = -\frac{V_{ba}}{d} \qquad [E \text{ منتظم}] \quad \textbf{(17 − 4 ب)}$$

ونرى من (المعادلة 17−4ب) أنّه يمكن كتابة وحدات المجال الكهربائي بدلالة الفولت لكل متر (V/m) وأيضاً النيوتن لكل كولوم (N/C). إنّ هذين الشكلين متكافئان لأنّ $1\,N/C = 1\,N{\cdot}m/C{\cdot}m = 1\,J/C{\cdot}m = 1\,V/m$.

وتخبرنا الإشارة السالبة في (المعادلة 17 − 4 ب) بأنّ المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ يتجه نحو نقصان الجهد V.

وحدات E هي:
$1\,N/C = 1\,V/m$



الشكل 17 − 5. (مثال 17 − 3).

المثال 17-3 الحصول على المجال الكهربائي من الفولتية.

شُحن لوحان متوازيان. فنتج فرق جهد بينهما مقداره $50\,V$. فإذا كان البعد بين اللوحين $0.050\,m$. فاحسب قيمة المجال الكهربائي في الفضاء بينهما (شكل 17 − 5).

النهج: نطبق (المعادلة 17 − 4 ب) للحصول على قيمة E باعتباره منتظماً.

الحل: قيمة المجال الكهربائي:

$$E = V_{ba}/d = (50\,V/0.050\,m) = 1000\,V/m$$

ملحوظة: تطبق (المعادلتان 17 − 4 أ و ب) على المجال الكهربائي المنتظم فقط.

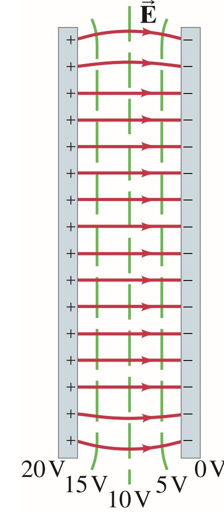
*العلاقات العامة بين $\vec{\mathbf{E}}$ و V

تأخذُ العلاقةُ بين $\vec{\mathbf{E}}$ و V في منطقةٍ (حيّز) ما حيث لا يكون $\vec{\mathbf{E}}$ منتظمًا- شكلًا مختلفًا عن (المعادلتين 17 − 4 أ، ب). وبشكل عام، فمن الممكن إثبات أن المجال الكهربائي في اتجاه ما وعند نقطة ما في الفضاء يساوي معدل نقصان الجهد الكهربائي مع المسافة في ذلك الاتجاه. وعلى سبيل المثال، فإن المركبة السينية x للمجال الكهربائي تعطى كالتالي: $E_x = -\Delta V/\Delta x$ حيث ΔV هو التغير في الجهد خلال مسافة قصيرة جدا Δx.

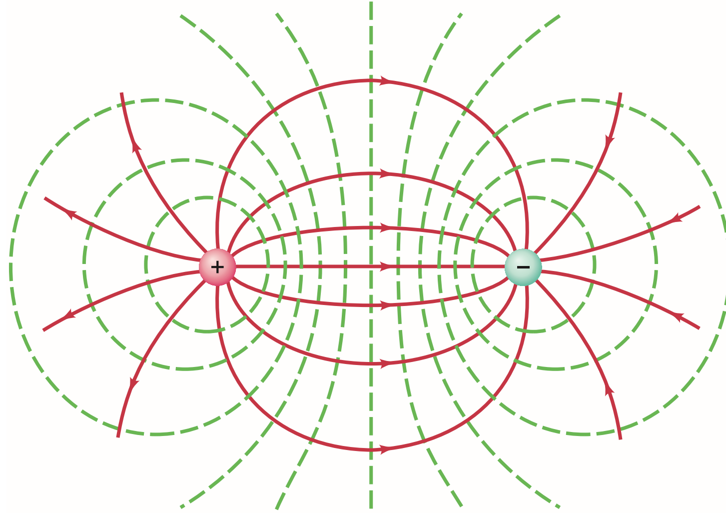
3-17 خطوط تساوي الجهد

يمكن تمثيل الجهد الكهربائي بيانيًا عن طريق رسم خطوط **تساوي الجهد**. أو سطوح تساوي الجهد في ثلاثة أبعاد. وسطح **تساوي الجهد** هو سطحٌ تمتلك النقاط الواقعة عليه جميعها الجهد نفسه؛ أي أنّ فرق الجهد بين أيّ نقطتين على هذا السطح يُساوي الصفر. ولا يتطلّب نقلُ شحنة ما بين أيّ نقطتين واقعتين عليه بذلَ أيّ شغل على سطح تساوي الجهد. ويجب أن يكون سطح تساوي الجهد عموديًا على المجال الكهربائي عند أيّ نقطة. وإذا لم يكن هذا هو الحال، أو إذا كانت هناك مركبة للمجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ موازية للسطح. فسيتطلّب ذلك بذل شغل لنقل الشحنة على امتداد السطح ضدّ المركبة $\vec{\mathbf{E}}$. وهذا ما سيتعارض مع كونه سطح تساوي الجهد عليه.

خطوط تساوي الجهد $\perp \vec{\mathbf{E}}$.



الشكل 17 – 6 تتعامد خطوط تساوي الجهد (الخضراء المقطعة) بين لوحين متوازيين مشحونين مع خطوط المجال الكهربائي (الحمراء المتصلة) دائمًا.



الشكل 17 – 7 تتعامد سطوح تساوي الجهد (الخضراء المقطعة) مع خطوط المجال الكهربائي (الحمراء المتصلة) دائماً، والتي تظهر هنا لجسمين مشحونين بشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في الإشارة (الثناقطبي الكهربائي).

إنّ حقيقة التعامد بين خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد تساعد على تحديد مواقع تساوي الجهد إذا علمنا أماكن خطوط المجال الكهربائي. ونستطيع إظهار خطوط تساوي الجهد على مخطط في بعدين عند نقاط التقاطع مع سطوح تساوي الجهد مع سطح المخطط. وتمّ رسم عدة خطوط تساوي جهد (الخطوط الخضراء المقطعة) على (الشكل 17 – 6) متعامدة مع خطوط المجال الكهربائي (الخطوط الحمراء) بين لوحين متوازيين عند فرق جهد 20 V. وتمّ اختيار اللوح السالب عشوائيًّا ليمثل الجهد الصفري. وعليه تمّ تحديد جهد كلّ خط من خطوط تساوي الجهد. لاحظ أنّ $\vec{\mathbf{E}}$ تشير باتجاه النقصان في V. وتظهر خطوط تساوي الجهد للحالة التي تمثل شحنتين متماثلتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة في (الشكل 17 – 7) كخطوط خضراء مقطعة. (يُسمّى الاتحاد بين الشحنتين المتساويتين الموجبة والسالبة "الثناقطبي الكهربائي" كما رأينا في (البند 16 – 8). انظر (الشكل 16 – 31 أ)).

وخلافاً لخطوط المجال الكهربائي التي تبدأ وتنتهي عند الشحنات الكهربائية، فإنّ خطوط تساوي الجهد وسطوحه مستمرة دائمًا ولا تنتهي أبدًا. وعليه، فهي تستمر لما بعد حدود (الشكلين 17 – 6 و 17 – 7). وتمثل الخريطة الكنتورية مثالًا مفيدًا على ذلك؛ يجب أن تمثل الخطوطُ الكنتورية خطوطَ تساوي جهد الجاذبية (شكل 17 – 8).

الموصلات كسطوح تساوي جهد.

لقد رأينا في (البند 16 – 9) أنّه لا وجود للمجال الكهربائي داخل الموصل في الحالة الساكنة، وإلاّ فإنّ الإلكترونات الحرّة ستشعر بالقوة وتبدأ بالحركة. وفي الحقيقة، فإنّ الموصل يجب أن يكون بمجمله عند الجهد نفسه في الحالة الساكنة. وتبعًا لذلك، فإنّ سطح الموصل سيكون سطح تساوي جهد. (وإذا كان هذا غير صحيح، فإنّ الإلكترونات الحرّة عند السطح ستبدأ بالحركة؛ لأنّه عندما يكون هناك فرق جهد بين أيّ نقطتين، فعندها يمكن أن يُبذل الشغلُ على الأجسام المشحونة لتحريكها). ويتفق هذا تمامًا مع النتيجة التي توصلنا إليها ونوقشت سابقًا، وهي أنّ اتجاه المجال الكهربائي عند سطح الموصل يجب أن يكون عموديًّا على السطح.



الشكل 17 – 8 تظهر الخارطة (مقطع من سييرا نيفادا في ولاية كاليفورنيا) خطوطًا كنتوريةً متواصلة، كل منها عند ارتفاع معين فوق مستوى سطح البحر. وهي هنا على فترات تتراوح عند 80-ft (25-m). وإذا سرت بمحاذاة أحد هذه الخطوط الكنتورية، فلن ترتقي إلى الأعلى أو تنحدر نحو الأسفل. ولكن إذا انتقلت من خط إلى آخر وخصوصًا إذا ارتقيت إلى الأعلى باتجاه متعامد على الخطوط، فإنك ستغير جهد الجاذبية (وبسرعة خاصةً عند تقارب الخطوط مع بعضها بعضا).

4-17 الإلكترون فولت كوحدة طاقة

يُعدُّ الجول وحدةً هائلةً جدًّا خصوصًا عند التعامل مع طاقات الإلكترونات والذرّات أو الجزيئات. ولهذا السبب تحديدًا تُستخدم وحدة أخرى هي **الإلكترون فولت** (eV). ويُعرّف واحد إلكترون فولت على أنّه الطاقة المكتسبة بواسطة جسم يحمل شحنة مقدارها يساوي الشحنة على الإلكترون $(q = e)$ نتيجة لحركته خلال فرق جهد مقداره 1 V. وبما أنّ قيمة الشحنة على الإلكترون هي $1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$. والتغير في طاقة الوضع يعادل qV. فإنّ 1 eV يعادل $(1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C})\cdot(1.0\,\mathrm{V}) \;=\; 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$:

إلكترون فولت (وحدة)

$$1\,\mathrm{eV} \;=\; 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}.$$

وسيخسر إلكترونٌ يتسارع خلال فرق جهد مقداره 1000 V طاقةَ وضع مقدارها 1000 eV. ويكتسب 1000 eV أو 1 كيلو إلكترون فولت (1 keV) من الطاقة الحركية. وبالمقابل. إذا تحرك جسمٌ ذو شحنةٍ تعادل ضعف شحنة الإلكترون $(= 2e \;=\; 3.2 \times 10^{-19}\,\mathrm{C})$ خلال فرق جهد مقداره 1000 V. فإن طاقته ستتغير بمقدار 2000 eV.

وعلى الرّغم من أنّ الإلكترون فولت وحدة مناسبة للتعبير عن طاقات الجزيئات والأجسام الأوّلية. إلاّ أنّه لا يعدّ من الوحدات الدولية (SI) المناسبة. ويجب أن يتمّ تحويل الإلكترون فولت خلال الحسابات إلى الجول باستخدام معامل التحويل كما أُعطي أعلاه. وعلى سبيل المثال كما في المثال $17-2$. فإنّ الإلكترون قد اكتسب طاقة حركية تعادل $8.0 \times 10^{-16}\,\mathrm{J}$. وفي الوضع الطبيعي. فإنّنا نذكر هذه الطاقة على أنّها $5000\,\mathrm{eV}\;(= 8.0 \times 10^{-16}\,\mathrm{J}/1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})$.
ولكن إذا احتجنا إلى تحديد سرعة هذا الجسم بدلالة الوحدات الدولية SI فيجب عند ذلك استخدام KE بدلالة الجول (J).

5-17 الجهد الكهربائي الناتج من الشحنات النقطية

يمكن اشتقاق الجهد الكهربائي الناتج من شحنة نقطية Q على بعد r منها من معادلة مجالها الكهربائي (معادلة $16-4$) باستخدام الرياضيات. ويؤخذ الجهد في هذه الحالة في مالا نهاية (∞)على أنّه الصفر ويساوي المجال الكهربائي $(E \;=\; kQ/r^2)$. في مالا نهاية الصفر. وتكون النتيجة:

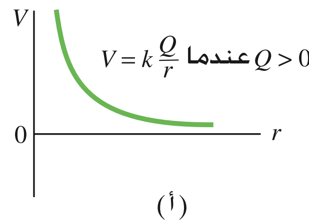
الجهد الكهربائي لشحنة نقطية $(V \;=\; 0$ عند $r \;=\; \infty)$

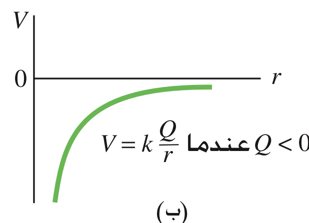
$$V \;=\; k\,\frac{Q}{r}$$

$$=\; \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\,\frac{Q}{r} \qquad \text{[شحنة نقطية واحدة]} \quad \mathbf{(5-17)}$$

حيث $k \;=\; 8.99 \times 10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$. وهنا. يمكن لنا افتراض أن V تمثل الجهد المطلق عند مسافة r من الشحنة Q حيث $V \;=\; 0$ عند $r \;=\; \infty$. أو قد نفترض أن V فرق جهد بين r ومالانهاية. لاحظ أنّ الجهد V يتناقص مع الأسّ الأوّل للمسافة. في حين يتناقص المجال الكهربائي (معادلة $16-4$) مع مربع المسافة .
وعلى الرغم من أن للجهد قيمة كبيرة وموجبة بجوار الشحنة الموجبة. إلاّ أنّ قيمته تؤول للصفر عند المسافات الكبيرة. ويكون الجهد بجوار الشحنة السالبة سالباً. ويتزايد باتجاه الصفر عند المسافات الكبيرة (شكل $17-9$).

تنويه:
لشحنة نقطية
$E \propto \frac{1}{r^2}$، $V \propto \frac{1}{r}$





الشكل 17 – 9 الجهد V كدالة في المسافة r الناتج من شحنة نقطية واحدة Q عندما تكون الشحنة: (أ) موجبة. (ب) سالبة.

المثال 4-17 الجهد الناتج من شحنة موجبة أو سالبة

حدّد الجهد عند نقطةٍ تبعد $0.50\ \text{m}$ عن: (أ) شحنة نقطيّة مقدارها $+20\ \mu\text{C}$. (ب) شحنة نقطيّة مقدارها $-20\ \mu\text{C}$.

النهج: يُعطى الجهد الناتج من شحنة نقطية (بالمعادلة $17-5$)، $V = kQ/r$.

الحـل: (أ) الجهد عند مسافة $0.50\ \text{m}$ من شحنة موجبة مقدارها $20\ \mu\text{C}$ هو:

$$V = k\frac{Q}{r}$$
$$= (9.0\times10^{9}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\left(\frac{20\times10^{-6}\ \text{C}}{0.50\ \text{m}}\right) = 3.6\times10^{5}\ \text{V}$$

(ب) وللشحنة الموجبة هو:

$$V = (9.0\times10^{9}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\left(\frac{-20\times10^{-6}\ \text{C}}{0.50\ \text{m}}\right) = -3.6\times10^{5}\ \text{V}$$

ملحوظة: يمكن للجهد أن يكون موجباً أو سالباً. وهو مخالف لطريقة حساب قيمة المجال الكهربائي؛ حيث جرت العادة إهمال إشارة الشحنات. أما بالنسبة إلى الجهد الكهربائي، فيجب أن تُضاف الإشارة خلال الحسابات.

حل المسألة

يجب تتبع إشارات الشحنات عند التعامل مع الجهد الكهربائي.

المثال 5-17 الشغل المبذول لجلب شحنتين موجبتين قرب بعضهما بعضا.

ما أقلُّ شغلٍ يجب بذله بواسطة قوّةٍ خارجيّةٍ لجلب شحنة مقدارها $q = 3.00\ \mu\text{C}$ من مسافةٍ بعيدة $(r \to \infty)$ إلى نقطةٍ تبتعد مسافة $0.500\ \text{m}$ عن شحنة $Q = 20.0\ \mu\text{C}$؟

النهج: لا نستطيع ببساطة ضرب القوّة في المسافة للحصول على الشغل؛ لأنّ القوّة غير ثابتة. وبدلاً من ذلك، نستطيع أن نساوي التغير في طاقة الوضع مع الشغل (الموجب) الناتج من القوّة الخارجيّة (الفصل السادس) و (المعادلة $17-3$): $W = \Delta \text{PE} = q(V_b - V_a)$. ونحصل على الجهدين V_b و V_a باستخدام (المعادلة $17-5$).

الحـل: الشغل الضروري للتغير في طاقة الوضع:

$$W = q(V_b - V_a) = q\left(\frac{kQ}{r_b} - \frac{kQ}{r_a}\right)$$

حيث $r_b = 0.500\ \text{m}$ و $r_a = \infty$. يعادل الجانب الأيمن للمعادلة داخل الأقواس الصفـــــر $(1/\infty = 0)$ وعليه:

$$W = (3.00\times10^{-6}\ \text{C})\frac{(8.99\times10^{9}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(2.00\times10^{-5}\ \text{C})}{(0.500\ \text{m})} = 1.08\ \text{J}$$

ملحوظة: لا يمكننا استخدام (المعادلة $17-4$) هنا؛ لأنّها تُطبّقُ فقط على المجالات الكهربائية المنتظمة. ولكننا نستخدم (المعادلة $17-3$) لأنّها دائمًا صحيحة.

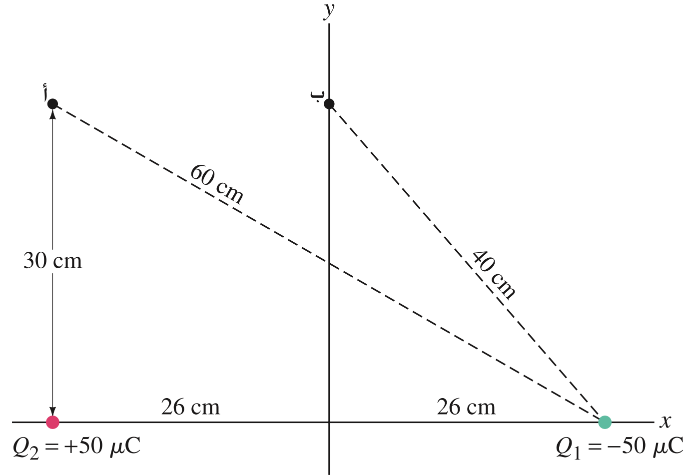
تنويه:

لا نستطيع استخدام $W = Fd$ إذا كانت F غير ثابتة.

تمرين ب: ما الشغل الضروريُّ لإحضار شحنة $q = 3.00\ \mu\text{C}$ موجودة على بعد $1.50\ \text{m}$ من شحنةٍ أخرى $Q = 20.0\ \mu\text{C}$ لتصبح على بعد $0.50\ \text{m}$ منها فقط؟

لتحديد المجال الكهربائي عند نقاط قريبة من تجمع شحنتين نقطيتين أو أكثر؛ علينا جمع المجال الكهربائي الناتج من كل شحنة على حدة. وبما أنّ المجال الكهربائي كمية متجهة، فإن هذه العملية قد تكون معقدة وتستغرق فترة طويلة. أمّا إيجاد الجهد الكهربائي عند نقطة ما والناتج من تجمع لشحنات نقطية فهو أسهل بكثير مما سبق؛ لأنّ الجهدَ الكهربائي كميةٌ قياسية، أي أنّك بحاجة فقط إلى جمع أرقام مع بعضها دون أن تكترث لأيّ اتجاه. ولهذا، يعدّ استخدام الجهد الكهربائي ميزة رئيسة عند التعامل مع المسائل المختلفة. ومع هذا، يجب أن نتذكر إضافة إشارات الشحنات خلال الحسابات.

تجمع الجهود ككميات قياسية (وتجمع المجالات كمتجهات)



الشكل 17 – 10 مثال 17 - 6. (انظر أيضاً إلى المثال 16 – 9، شكل 16 – 28).

المثال 17-6 الجهد فوق شحنتين.

احسب الجهد الكهربائي (أ) عند النقطة "أ" في (الشكل 17 – 10) الناتج من الشحنتين الظاهرتين. (ب) عند النقطة "ب". [وهذا (كمثال 16 – 9). و (الشكل 16 – 28) حيث قمنا بحساب المجال الكهربائي عند تلك النقطتين].

النهج: الجهد الكلي عند النقطة أ (أو عند النقطة ب) هو مجموع الجهود الناتجة عند تلك النقطة من كلٍ من الشحنتين Q_1 و Q_2. ويُعطى الجهد الناتج من كل شحنة مفردة (بالمعادلة 17 – 5). دون الاهتمام بالاتجاهات لأنّ الجهدَ الكهربائي كميةٌ قياسية. ومع هذا، فعلينا تتبع إشاراتِ الشحنات.

الحل: نجمع الجهدين عند النقطة "أ" الناتجين من كل من Q_1 و Q_2 كلًّا على حدة. ونستخدم (المعادلة 17 – 5) لكل منهما:

$$V_A = V_{A2} + V_{A1}$$
$$= k\frac{Q_2}{r_{2A}} + k\frac{Q_1}{r_{1A}}$$

حيث $r_{1A} - 60\ \text{cm}$ و $r_{2A} = 30\ \text{cm}$. وعليه:

$$V_A = \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(5.0 \times 10^{-5}\ \text{C})}{0.30\ \text{m}} + \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(-5.0 \times 10^{-5}\ \text{C})}{0.60\ \text{m}}$$
$$= 1.50 \times 10^6\ \text{V} - 0.75 \times 10^6\ \text{V}$$
$$= 7.5 \times 10^5\ \text{V}$$

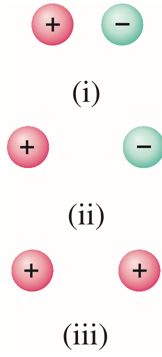
(ب) وعند النقطة ب: $r_{1B} = r_{2B} = 0.40\ \text{m}$ وعليه:

$$V_B = V_{B2} + V_{B1}$$
$$= \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(5.0 \times 10^{-5}\ \text{C})}{0.40\ \text{m}} + \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(-5.0 \times 10^{-5}\ \text{C})}{0.40\ \text{m}}$$
$$= 0\ \text{V}$$

ملحوظة: يلغي الحدان المجموعان في (ب) بعضهما بعضًا عند أيّ نقطةٍ متساوية البعد عن Q_1 و($r_{1B} = r_{2B}$) Q_2. وعليه، فإنّ الجهد سيعادل الصفر في كلّ مكان على السطح عند منتصف المسافة بين الشحنتين. ويمثل هذا المستوى سطح تساوي جهد حيث $V = 0$.

تنويه:
الجهد كمية قياسية، وليس له مركبات.

ويمكن أن يجري هذا الجمع البسيط على أيّ عدد من الشحنات النقطية.



الشكل 17 - 11 (مثال 17 - 7).

المثال المفاهيمي 17-7 طاقات الوضع.

خذ بالحسبان الأزواج الثلاثة للشحنتين Q_1 و Q_2 في (الشكل 17 – 11). (أ) ما الزوج الذي يمتلك طاقة وضع موجبة ؟ (ب) ما الزوج الذي يمتلك طاقة وضع أكثر سالبية؟ (جـ) ما الزوج الذي يتطلّب أكبر مقدارٍ من الشغل لفصل الشحنتين عن بعضهما بعضًا إلى مالا نهاية؟ افترض أنّ الشحنات جميعها متساوية في المقدار.

الحل: تعادل طاقة الوضع الشغل الضروري لجلب الشحنتين قرب بعضهما بعضًا بدءًا من مسافةٍ بعيدةٍ جدًّا (∞). وافترض أنّ الشحنة الموجبة على اليسار هي أصلاً موجودة في موضعها. إذن، فالشغل اللازم لإحضار الشحنة الثانية قرب الأولى من مسافة بعيدة جدًّا (∞) هو:

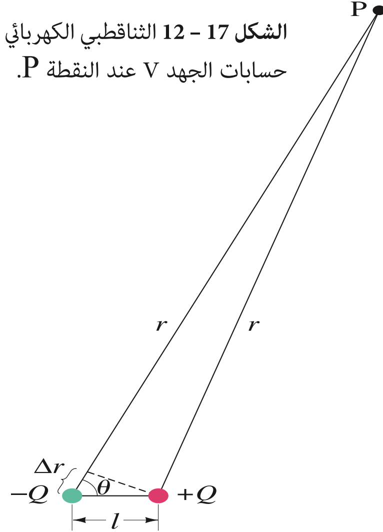
$$W = Q_2 V_{ba} = k\frac{Q_1 Q_2}{r}$$

حيث تمثل r المسافة النهائية الفاصلة بينهما. لذا، فإن طاقة الوضع بين الشحنتين هي:

$$\text{PE} = k\frac{Q_1 Q_2}{r}$$

(أ) الزوج (iii) له طاقة وضع موجبة لأن الشحنتين متماثلتان. (ب) الزوج (i) يظهر أعلى طاقة وضع سالبة حيث إنّ للشحنتين إشارتين مختلفتين، والمسافة الفاصلة بينهما أقل من تلك التي بين الزوج (ii). أي أن r أصغر للزوج (i). (جـ) سيتطلب الزوج (i) أكبر قدر من الشغل لفصله إلى مالا نهاية. وكلّما كانت طاقة الوضع أكثر سالبية ازداد مقدار الشغل الضروري لفصل الشحنتين عن بعضهما لجعل PE ترتفع إلى الصفر ($r = \infty$).

* 6-17 الجهد الناتج من الثناقطبي الكهربائي وعزم الثناقطبي



الشكل 17 – 12 الثناقطبي الكهربائي حسابات الجهد V عند النقطة P.

يُدعى النظام المكوّن من شحنتين نقطيتين متساويتين في المقدار Q ومختلفتين في الإشارة المفصولتين عن بعضهما بمسافة l **الثناقطبي الكهربائي**. ويبين (الشكل 17 – 7) خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد للثناقطبي. ومن المفيد دراسة الثناقطبي عن قربٍ ويتمتّع نظرًا لوروده كثيرًا في الفيزياء وفي أماكن أخرى من ضمنها علوم الحياة الجزيئية.

ويعطى الجهد الكهربائي للثناقطبي عند النقطة العشوائية P في (الشكل 17 – 12) بجمع الجهدين الناتجين من الشحنتين كالتالي:

$$V = \frac{kQ}{r} + \frac{k(-Q)}{r + \Delta r} = kQ\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta r}\right) = kQ\frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)}$$

حيث تمثّل r المسافة بين P والشحنة الموجبة، في حين تمثّل $r + \Delta r$ بُعد الشحنة السالبة. وتصبح هذه المعادلة أكثر سهولة عندما نتعامل مع أيّ نقطة P بحيث يكون بعدها عن الثناقطبي أكبر بكثير من المسافة الفاصلة بين الشحنتين؛ أيّ عندما يكون $r \gg l$. ونستطيع أن نرى من الرسم أنّ $\Delta r \approx l\cos\theta$ حيث $\Delta r = l\cos\theta$، $r \gg \Delta r$. ونستطيع إهمال Δr في المقام مقارنةً مع r. لنحصل على:

الجهد بعيدًا عن الثناقطبية

$$V \approx \frac{kQl\cos\theta}{r^2} \qquad [\text{الثناقطبي: } r \gg l] \quad \textbf{(17 – 6 أ)}$$

كما نرى أنّ الجهد يتناقص مع مربّع المسافة من الثناقطبي، أمّا جهد شحنة نقطية أحادية فيتناقص مع الأسّ الأوّل للمسافة (معادلة 17 – 5). ولا غرابة هنا أنْ نجد أنّ جهد الثناقطبي يتناقص بسرعة أكبر للثناقطبي منه للشحنة النقطية الأحادية؛ لأنّ الشحنتين في الثناقطبي تميلان لمعادلة بعضهما بعضا بسبب قربهما من بعض عندما يُنظر إليهما من مسافات بعيدة.

عزم الثناقطبية $p = Ql$

ويشار إلى حاصل ضرب Ql في (المعادلة 17 – 6 أ) **بعزم الثناقطبي** p للثنائي. وتصبح (المعادلة 17 – 6 أ) بدلالة عزم الثناقطبي كالتالي:

$$V \approx \frac{kp\cos\theta}{r^2} \qquad [\text{الثناقطبي: } r \gg l] \quad \textbf{(17 – 6 ب)}$$

ومع أنّ وحدة عزم الثناقطبي هي كولوم.متر ($C\cdot m$)، إلا أنّ هناك وحدة أصغر تستعمل للجزيئات في بعض الأحيان تدعى ديباي: 1 ديباي $= 3.33 \times 10^{-30}\ C\cdot m$.

تطبيق الفيزياء
الثاقطبية في علوم الحياة الجزيئية

الجدول 2-17
عزوم ثنا قطبي لجزيئات مختارة

الجزيئات	عزوم ثنا قطبي لجزيئات مختارة (C· m)
$H_2^{(+)}O^{(-)}$	6.1×10^{-30}
$H^{(+)}Cl^{(-)}$	3.4×10^{-30}
$N^{(-)}H_3^{(+)}$	5.0×10^{-30}
$>N^{(-)}—H^{(+)}$	$\approx 3.0 \times 10^{-30}$‡
$>C^{(+)}=O^{(-)}$	$\approx 8.0 \times 10^{-30}$‡

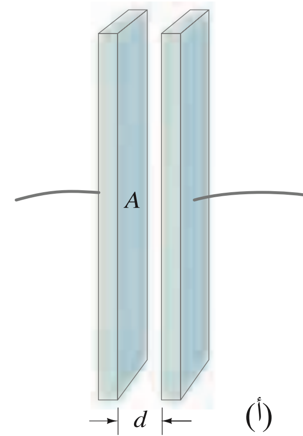
‡ تظهر أخر مجموعتين غالبا" في الجزيئات الكبيرة, و عليه فأن مقدار عزم الثنا قطبي سيتغير على بقية الجزيء.

غالبًا ما تمضي الإلكترونات وقتًا أطول بالقرب من ذرّةٍ على حساب الأخرى في جزيئات كثيرة بالرغم من تعادلها كهربائيًّا ممّا يسبب فصل الشحنات. وتمتلك هذه الجزيئات عزم الثناقطبي. وتدعى **بالجزيئات القطبية**. ولقد رأينا من قبل أنّ الماء (شكل 16 – 4) جزيءٌ قطبي فعلا. وقد ناقشنا جزيئات أخرى مماثلة لعلوم الحياة الجزيئية (بند 16 – 11). ويعرض (الجدول 17 – 2) عزوم ثناقطبية لجزيئات عديدة. وتدلّ الإشارتان + و – على موضع تكدّس هذه الشحنات. ويمثل آخر معطيين في الجدول قسمًا من جزيئات عضويّة عديدة تؤدّي دورًا مهمًّا في علوم الحياة الجزيئية.

7-17 المكثف

المكثف: جهاز قادرٌ على تخزين الشحنة الكهربائية. ويتكوّن من جسمين موصلين (عادةً لوحين أو ورقتين) وضعا بقرب بعضهما بعضًا دون أن يتلامسا. وتستخدم المكثفات كثيرا في الدارات الإلكترونية. وتُخزّنُ الشحنات التي يمكن استغلالها لاحقا في عدّةِ أجهزةٍ مختلفةٍ ومن ضِمنها ومّاضُ آلةِ التصوير. وكذلك كطاقة بديلة لجهاز الحاسوب عند انقطاع مصدر الطاقة الرئيس. وتمنع المكثفات دفقات الشحنات المفاجئة والطاقة لتحمي الدارات الكهربائية تباعًا. كما تخدم المكثفات الدقيقة جدًّا كذاكرة "للآحاد" و"الأصفار" في رمز التشفير الثنائي في ذاكرة الحواسيب العشوائية (RAM). وللمواسعات تطبيقات أخرى كثيرة سنناقش بعضها لاحقًا.

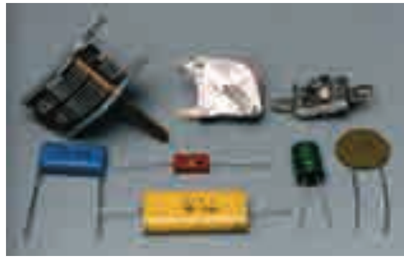
تطبيق الفيزياء
استعمالات المكثفات



(أ)



(ب)


(ج)

الشكل 17 - 13 مخططات المكثفات : (أ) متوازي الألواح. و(ب) أسطواني (متوازي الألواح ملفوف). و(جـ) صورة لبعض المكثفات الحقيقية.

يتكوّن المكثف البسيط من زوج ألواح متوازية ذات المساحة A. وهما بعيدان عن بعضهما بعضًا بمسافة صغيرة d(شكل 17 – 13 أ). وغالبًا ما يتمّ لفها على شكل أسطوانة بورقة أو أي عازل آخر يفصل بين اللوحين كما في (الشكل 17 – 13 ب). ويمثل (الشكل 17 – 13 جـ) صورة لبعض المكثفات الحقيقية والمستخدمة في تطبيقات مختلفة. ويمثل الرمز


[رمز المكثف]

في الشكل مواسع ما. وهناك رمز آخر للمواسع يمكن أن تصادفه وهو ⊣(. أمّا البطّاريّة التي تُعدّ مصدرًا للفولتيّة فتمثّل بالرمز التالي:

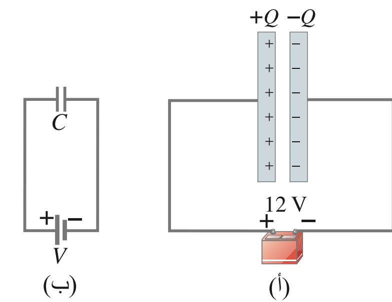

[رمز البطارية]

مع ذراعين غير متساويين.

وإذا طبقت فولتيّة على المكثّف عن طريق توصيل المكثف إلى بطارية باستخدام أسلاك توصيل كهربائية كما في (الشكل 17 – 14). فإنّ اللوحين سيُشحنان بسرعة. وسيكتسب أحد اللوحين شحنة سالبة. في حين سيكتسب الآخر شحنة موجبة. وسيصبح كلّ قطب للبطارية بالإضافة إلى اللوح الموصل فيه عند الجهد الكهربائي نفسه. وعليه. ستظهر فولتية البطارية الكلية خلال المكثف. ولقد وُجِدَ لمواسع ما أنّ مقدار الشحنة Q المكتسبة بواسطة كلّ لوح يتناسب مع مقدار فرق الجهد V بينهما :

$$Q = CV \qquad (7-17)$$

ويدعى ثابت التناسب C في (المعادلة 17 – 7) سعة المكثف.



(أ) (ب)

الشكل 17 - 14 مواسع متوازي الأضلاع موصول ببطارية. (ب) الدارة السابقة نفسها مبينة باستخدام الرموز.

السعة

وحدة السعة هي الكولوم لكلّ فولت. وتُسمّى **الفاراد** (F). وتتراوح سعة المكثّفات المستخدمة بين 1 pF (بيكوفاراد= 10^{-12} F) إلى $10^{3}\ \mu F$ (ميكروفاراد = 10^{-6} F). وأوّل من اقترح العلاقة المعطاة (بالمعادلة $17-7$) هو فولتا في نهاية القرن الثامن عشر.

وحدة السعة: الفاراد ($1\ F = 1\ C/V$)

ابتداءً من الآن. سنستخدم ببساطة V (بالمائل) للدلالة على فرق الجهد كالذي تولده البطارية بدلًا من V_{ba} أو $V_b - V_a$ كما هو سابقًا. (احرص جيّدًا على التمييز بين V و C المائلتين والدالتين على الفولتيّة والسعة و C و V غير المائلتين والدالتين على الوحدتين الفولت والكولوم).

تنويه:

V = فرق الجهد من الآن فصاعداً.

بشكل عام. لا تعتمد السعة على Q و V. بل تعتمد قيمتها فقط على حجم اللوحين الموصلين بالنسبة لبعضهما وشكلهما وموضعهما. وعلى المادة الفاصلة بينهما أيضًا. وتُعطى سعة المكثف متوازي اللوحين المفصولين عن بعضهما بالهواء بمسافة d ومساحة A (شكل $17-13$ أ) كالتالي:

تعتمد السعة على الصفات المميزة للمواسع فقط وليس على Q أو V.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \qquad \text{[مواسع ذو اللوحين المتوازيين]} \quad \mathbf{(8-17)}$$

ونرى هنا أنّ C تعتمد على المعاملات الهندسية مثل A و d وليس على Q و V. ونظهر اشتقاق هذه العلاقة المفيدة في البند الاختياري على الصفحة القادمة. وتعطى قيمة الثابت ϵ_0 معامل النفاذية للفراغ كما رأيناه في الفصل السادس عشر بـ $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$.

المثال 17-8 **حسابات المكثف.**

(أ) احسب سعة مواسع ذي لوحين متوازيين أبعادهما $20\ cm \times 3.0\ cm$ تفصلهما طبقةٌ من الهواء سمكها 1.0-mm. (ب) ما الشحنة على كلّ لوحٍ إذا علمت أنّ 12-V بطارية قد وُصلت باللوحين ؟ (جـ) ما المجال الكهربائي بين اللوحين؟ (د) قدّر مساحة اللوحين الضرورية للحصول على سعة مقدارها فاراد واحد بدلالة المسافة الفاصلة بينهما d.

النهج: تحسب السعة بدلالة (المعادلة $17-8$): $C = \epsilon_0 A/d$. ويتمّ الحصول على الشحنة على كلّ لوحٍ من تعريف السعة: (معادلة $17-7$): $Q = CV$. وبما أنّ المجال الكهربائي منتظم. لذا نستطيع استخدام (المعادلة $17-4$ ب) لحساب القيمة $E = V/d$. ونستخدم (المعادلة $17-8$) مرة أخرى في (د).

الحل : (أ) المساحة $A = (20 \times 10^{-2}\ m)(3.0 \times 10^{-2}\ m) = 6.0 \times 10^{-3}\ m^2$. وعليه. فإنّ السعة C:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2) \frac{6.0 \times 10^{-3}\ m^2}{1.0 \times 10^{-3}\ m} = 53\ pF$$

(ب) والشحنة على كلّ لوحٍ هي:

$$Q = CV = (53 \times 10^{-12}\ F)(12\ V) = 6.4 \times 10^{-10}\ C$$

(جـ) قيمة E من (المعادلة $17-4$ ب) للمجال المنتظم:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{12\ V}{1.0 \times 10^{-3}\ m} = 1.2 \times 10^{4}\ V/m$$

(د) نحلّ لإيجاد A في (المعادلة $17-8$). ونعوّض $C = 1.0\ F$ و $d = 1.0\ mm$ لكي نجد أنّ مساحة اللوحين:

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0} \approx \frac{(1\ F)(1.0 \times 10^{-3}\ m)}{(9 \times 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2)} \approx 10^{8}\ m^2$$

ملحوظة: هذه مساحة مربّع طول ضلعه 10^4 m أو 10 km. حيث تشبه مساحة مدينة كسان فرانسيسكو أو مدينة بوسطن! أي أنّ مواسعات ذات سعات كبيرة لا تصلح لبناء متسع ذي اللوحين المتوازيين.

ومنذ فترة ليست بقصيرة. كانت السعات الأكبر من $1\ \mu F$ شيئًا غير معتاد. أمّا الآن فتتوافر مواسعات ذات سعات تصل إلى 1 أو 2 F. ومع هذا. فهي صغيرة لا يتعدى طول أحد جوانبها عدة سنتيمترات . وتستخدم هذه المكثفات مصادر للقدرة البديلة. كاستخدامها في ذاكرة الحواسيب والإلكترونيات حيث يمكن المحافظة على الوقت والتاريخ بدقة عن طريق الانسياب الدقيق للشحنات.

تطبيق الفيزياء

كمصدر للطاقة الاحتياطية.

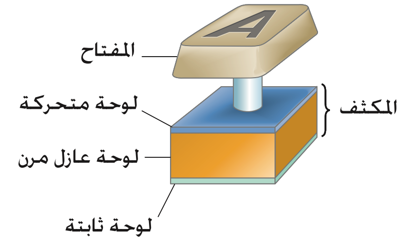
سعة عالية جداً

ويمكن صنع هذه المكثفات ذات السعات المرتفعة من الكربون "النشط" ذي المسامية العالية جدًّا والمساحة السطحية العالية جدًّا، علمًا بأنّ المساحة السطحية لعُشر غرام من الكربون النشط تُعادل $100\ m^2$. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ الشحنات المتساوية بالمقدار والمختلفة في الإشارة يمكن لها أن توجد في "طبقة مزدوجة" كهربائية ذات سمك لا يتجاوز $10^{-9}\ m$.

ويعتمد عمل لوحة مفاتيح لأحد أنواع الحواسيب على السعة. وكما هو مبين في (الشكل 17 – 15). فإنّ كلّ مفتاح يتمّ توصيله باللوح العلوي لمواسع. ويتحرك اللوح العلوي للمواسع نحو الأسفل عند ضغط المفتاح لتقل المسافة بين لوحي المكثف وتزداد السعة تباعًا ((معادلة 17 – 8): كلّما قلّت d ازدادت C). ويصبح التغيّر في السعة إشارة كهربائية يتمّ تسجيلها في دارة إلكترونية.

تطبيق الفيزياء

مفاتيح الحاسوب



الشكل 17 - 15 مفتاح من لوحة مفاتيح حاسوب. يعمل ضغط المفتاح على تقليل فراغ المكثف، فتزداد السعة التي يمكن كشفها إلكترونياً.

تمرين جـ: لوحان دائريان نصف قطرهما 5.0 cm، وتفصلهما طبقة هواء سمكها 0.10-mm. ما مقدار الشحنة على كلّ لوح عند إيصالهما ببطارية 12-V؟

* اشتقاق سعة مواسع متوازي الألواح

لقد تمّ اشتقاق (المعادلة 17 – 8) باستخدام النتيجة من (البند 16 – 10) لقانون غاوس. وتحديداً المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين والمعطى حسب (المعادلة 16 – 10):

$$E = \frac{Q/A}{\epsilon_0}$$

وعند دمج هذه المعادلة مع (معادلة 17 – 4 أ) $V = Ed$ نحصل على:

$$V = \left(\frac{Q}{A\epsilon_0}\right)d$$

وعليه، نعرف السعة من (معادلة 17 – 7) كالتالي:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{(Q/A\epsilon_0)d} = \epsilon_0\frac{A}{d}$$

وهي (المعادلة 18 – 17).

8-17 العوازل

هناك لوح عازل في معظم المكثفات من الورق أو البلاستيك يطلق عليه **العازل الكهربائي** بين اللوحين. ويقدم هذا العازل الكهربائي عدة فوائد هي: 1- يسمح بتطبيق فولتية عالية دون أن ينهار المكثف (دون انسياب الشحنات خلاله كما هو الحال في الهواء). 2- يسمح باقتراب اللوحين من بعضهما بعضًا دون أن يتلامسا. فتقل d وتزداد C تباعًا حسب (المعادلة 17 – 8). 3- وُجد عمليًّا أنّ قيمة السعة ستزداد بمقدار K عند ملء الفراغ بين اللوحين الموصلين بالعازل الكهربائي. وتُسمّى K ثابت العازلية الكهربائي. إذن، لمواسع متوازي اللوحين:

ثابت العازلية الكهربائي

مواسع ذو اللوحين المتوازيين وبينهما عازل.

$$C = K\epsilon_0\frac{A}{d} \qquad \textbf{(9 – 17)}$$

ويمكن كتابته أيضًا كالتالي:

$$C = \epsilon\frac{A}{d}$$

حيث تسمّى:

$$\epsilon = K\epsilon_0$$

نفاذية المادة.

ويُعطي (الجدول 17 – 3) قيم **ثابت العازلية الكهربائي** لمواد مختلفة. بالإضافة إلى متانة العازل الكهربائية وهي قيمة المجال الكهربائي العظمى التي يتحملها العازل قبل انهياره (انسياب الشحنات خلاله).

الجدول 3-17 ثوابت العوازل الكهربائية

العازل	ثابت الكهربائي المادة	متانة العوازل الكهربائي
الفراغ	1.0000	
الهواء (1atm)	1.0006	3×10^6
فينيل (بلاستيك)	2.2	10×10^6
كوارتز	2.6	24×10^6
نفط	2–4	50×10^6
زجاج بايركس	3.7	15×10^6
مطاط	4.3	8×10^6
نيوبيرين	4	12×10^6
بورسلين	5	14×10^6
مايكا ماء (سائل)	6.7	12×10^6
	6–8	5×10^6
	7	150×10^6
	80	
نيترات السترونتيوم	300	8×10^6

مثال مفاهيمي 9-17 إدخال مادة عازلة كهربائيًا عند ثبات V.

يتكوّن مواسع يملؤه الهواء من لوحين متوازيين تفصلهما مسافة d موصولين ببطاريات ذات فولتية V. ويحمل كلٌّ منهما شحنةً مقدارها Q. إذا أدخلت بين لوحيه قطعة من مادةٍ عازلة حيث $K = 3$ وهو لا يزال موصولًا بالبطارية. فهل ستزداد Q، أم تقل، أم ستبقى كما هي؟

الحل: بما أنّ المكثّف سيبقى موصولًا بالبطارية. فإنّ الفولتيّة ستبقى ثابتةً وستعادل فولتية البطارية V. وستزداد السعة C عند إدخال المادة العازلة الكهربائية لأن K من (المعادلة $17 - 9$) قد ازدادت. ومن العلاقة $Q = CV$، إذا بقيت V ثابتة، فإنّ Q يجب أن تزداد مع زيادة C. وبعد إدخال العازل الكهربائي. ستسحب كميّاتٍ إضافيّةٍ من شحنة البطارية، وسترسب على لوحي المكثف مع ازدياد السعة.

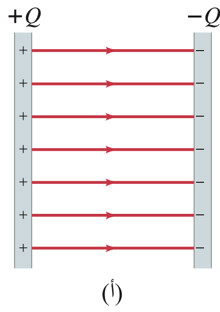
تمرين د: إذا ملأ العازلُ الكهربائي في (المثال $17 - 9$) الفراغ بين اللوحين، فما معاملُ تغيّر (أ) السّعة؟ (ب) الشحنة على كلّ لوح؟

مثال مفاهيمي 10-17 إدخال عازل كهربائي داخل مواسع معزول.

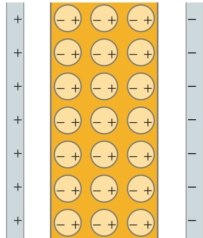
افترض أنّ المكثف المليء بالهواء في (المثال $17 - 9$) قد شُحن (إلى Q) ثم فُصِلَ عن البطارية. فهل سيتغير أيّ من Q، أو C، أو V بعد إدخال العازل الكهربائي بين لوحيه؟

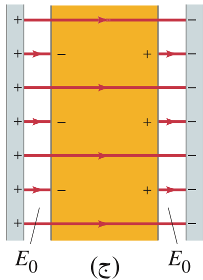
الإجابة: تبقى الشحنة ثابتة ولا تتغير قيمتها لأن المكثف معزول، ولن تذهب الشحنة إلى أيّ مكان آخر. وستزداد السعة نتيجة وضع العازل داخل المكثف (معادلة $17 - 9$). وستنقص الفولتية حسب (المعادلة $17 - 7$): $Q = CV$ أو $V = Q/C$. وإذا بقيت Q ثابتة وازدادت قيمة C (وهي في المقام) فإنّ V ستنقص.

الشكل 17 - 16 النظرة الجزيئية لتأثيرات العازل الكهربائي.



(أ)


(ب)



(ج)

* الوصف الجزيئي للعوازل الكهربائية

دعونا نختبر من وجهة النظر الجزيئية لماذا تكون سعة المكثف أكبر عند وجود عازل كهربائي بين لوحيه. ولنبدأ بمواسع يفصل الهواء بين لوحيه حيث يحمل أحدهما شحنة $+Q$، في حين يحمل الآخر الشحنة $-Q$ (شكل $17 - 16$ أ). وافترض أنّ المكثف معزول (غير موصول ببطارية). وعليه، فلن تنساب الشحنات إلى اللوحين أو منهما. ويعطى فرق الجهد بين اللوحين V_0 (بالمعادلة $17 - 7$):

$$Q = C_0 V_0$$

تُشير الرموز السفلية إلى الهواء بين اللوحين. سندخل الآن عازلًا كهربائيًّا بين اللوحين (شكل $17 - 16$ ب). وبسبب وجود المجال الكهربائي بين لوحي المكثف، فإن جزيئات العازل الكهربائي سترتب نفسها كما هو مبين في (الشكل $17 - 16$ ب). وإذا كانت جزيئات العازل الكهربائي قطبية، فإنّ أطرافها الموجبة ستنجذب باتّجاه اللوح السالب والعكس صحيح. وكذلك في حالة كون جزيئات العازل الكهربائي غير قطبية، فإنّ إلكترونات هذه الجزيئات ستعمد إلى التحرك قليلًا باتّجاه لوح المكثف الموجب ليكون تأثير ذلك كما هو في الجزيئات القطبية. لذا، فإنّ النتيجة النهائية لاصطفاف الثناقطبي هو وجود شحنات سالبة صافية على الحافة الخارجية للعازل الكهربائي المواجهة للوح الموجب، ووجود شحنات موجبة صافية على الجانب المعاكس كما هو مبين في (الشكل $17 - 16$ جـ).

وينتج من ذلك توقف بعض خطوط المجال الكهربائي وعدم مرورها من خلال العازل الكهربائي، حيث تنتهي هذه الخطوط أو تختفي قرب الشحنات المستحثة على سطح العازل الكهربائي كما هو مبين في (الشكل $17 - 16$جـ). وهذا ما يجعل المجال الكهربائي داخل العازل الكهربائي أقلّ منه في الهواء؛ أي أنّ المجال الكهربائي بين لوحي المكثف المحتوي على العازل الكهربائي قد يتناقص بمقدار يتناسب مع المعامل K. وتناقص الجهد بين طرفي المكثف يتناسب أيضاً مع المعامل K نفسه حيث $V = Ed$ (معادلة $17 - 4$) وعليه من (المعادلة $17- 7$) حيث $Q = CV$، يجب أنّ تزداد السعة C بمقدار يتناسب أيضاً مع المعامل K نفسه كي تبقى Q ثابتة.

9-17 تخزين الطاقة الكهربائية

يخزّن المكثّف الكهربائي الطاقة الكهربائية عن طريق فصل الشحنات + و - . إنّ الطاقة المختزنة في المكثف تعادل الشغل المبذول لشحنه. ومحصّلة تأثير شحن المكثف هو إزالة شحنات من أحد اللوحين ثمّ إضافتها إلى اللوح الآخر. وهذا ما تفعله البطارية عند وصلها بالمكثف. وفي البداية، عندما لا يكون المكثف مشحوناً، فلا ضرورة هنا لبذل أيّ شغل لنقل أول كمية من الشحنات. ولكن عند نقل كمية أخرى من الشحنات، تظهر الحاجة إلى بذل الشغل لنقل الشحنات تحت تأثير الجهد المتزايد V. أمّا الشغل الضروري لإضافة كمية صغيرة من الشحنة Δq، عندما يكون فرق الجهد بين اللوحين V، فهو $\Delta W = V\,\Delta q$. ويصبح الشغل الكلي الضروري بذله لنقل شحنة كلية Q والمكافىء لنقل الشحنة Q كلّها عبر فرق الجهد يساوي متوسط الفولتية خلال العملية. (وهذا كحساب الشغل المبذول لضغط زمبرك تمامًا. (البند $6-4$) صفحة 147). ومتوسط الفولتية هو: $(V_f - 0)/2 = V_f/2$ حيث V_f هي الفولتية النهائية. لذلك، فإنّ الشغل لنقل الشحنة الكلية Q من لوح إلى آخر هو:

$$W = Q\frac{V_f}{2}$$

وبناءً على ذلك، نستطيع القول بأنّ طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في المكثف هي:

$$\text{PE} = \text{الطاقة} = \tfrac{1}{2}QV$$

حيث V فرق الجهد بين الألواح (لقد تخلّصنا من الرمز السفلي) وQ هي الشحنة على كلّ من اللوحين. وبما أنّ $Q = CV$ فيمكننا أن نكتب:

$$\text{PE} = \tfrac{1}{2}QV = \tfrac{1}{2}CV^2 = \tfrac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \qquad \textbf{(10 – 17)}$$

Energy stored in capacitor

المثال 17-11 الطاقة المختزنة في المكثف.

تخزّنُ وحدة ومّاض آلة تصوير (شكل $17-17$) طاقة داخل مواسع ($150\text{-}\mu\text{F}$) عند 200 V. فما مقدار الطاقة التي يمكن تخزينها؟

النهج: نستخدم (المعادلة $17-10$) على الشكل $\text{PE} = \frac{1}{2}CV^2$، وباستخدام C و V المعطاة.

الحل: الطاقة المختزنة هي:

$$\text{PE} = \tfrac{1}{2}CV^2 = \tfrac{1}{2}(150\times10^{-6}\text{ F})(200\text{ V})^2 = 3.0\text{ J}$$

ملحوظة : إذا فرّغت الطاقة خلال $\frac{1}{1000}$ من الثانية (10^{-3} s) فإنّ القدرة الناتجة ستكافىء 3000 W.

تمرين هـ : يخزن مواسع 0.50 J من الطاقة عند 9.0 V. فما سعته؟

تطبيق الفيزياء

وماض آلة تصوير



الشكل 17 - 17 وحدة ومّاض آلة التصوير

مثال مفاهيمي 17-12 ازدياد البعد الفاصل بين لوحي مواسع.

يحمل مواسع متوازي اللوحين شحنة Q ليُفصل بعد ذلك عن البطارية. إذا كانت المسافة الفاصلة بين اللوحين بدايةً هي d، ثم أُبعد اللوحان عن بعضهما لتصبح المسافة الفاصلة بينهما $2d$، فما التغير الذي سينتج من ذلك على طاقة المكثف المختزنة؟

الحل: عندما تزداد المسافة الفاصلة بين اللوحين d، فإنّ السعة تتناقص بمقدار يتناسب مع المعامل K حسب (المعادلة $17-8$): $C = \epsilon_0 A/d$. ولن تتغير الشحنة Q. واستنادا إلى (المعادلة $17-10$)، فإنّ PE المختزنة ستزداد بمقدار الضعف حيث استخدمنا $\text{PE} = \frac{1}{2}Q^2/C$؛ لأنّنا نعلم أنّ Q ستبقى كما هي، في حين تنخفض قيمة C إلى النصف.

ملحوظة: نستطيع فهم ازدياد الطاقة المختزنة من وجهة نظر فيزيائية: تمّ شحن اللوحين بالتساوي، ولكن بشحنتين مختلفتين في الإشارة بحيث يسمح لهما هذا جذب بعضهما بعضًا. ويجب أن نبذل شغلًا إذا رغبنا بإبعادهما عن بعضهما، وبذلك نكون قد رفعنا مقدار طاقة وضعهما.

من المفيد أن ننظر إلى الطاقة المختزنة في المكثف على أنّها مختزنة في المجال الكهربائي بين لوحيه. وعلى سبيل المثال، سنحسب الطاقة المختزنة في مواسع متوازي اللوحين بدلالة المجال الكهربائي.

لقد رأينا أنّ المجال الكهربائي $\mathbf{E}$ بين لوحين متوازيين قريبين من بعضهما يكاد يكون منتظمًا. وترتبط قيمته بفرق الجهد حسب العلاقة التالية: $V = Ed$ (معادلة 17 – 4) حيث تمثل d المسافة الفاصلة بين اللوحين. وتخبرنا (المعادلة 18 – 8) أيضاً أنّ $C = \epsilon_0 A/d$ لمواسع متوازي اللوحين. لذلك:

$$\text{PE} = \tfrac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\epsilon_0 A}{d}\right)(E^2d^2)$$
$$= \tfrac{1}{2}\epsilon_0 E^2 Ad$$

وتمثّل الكمية Ad الحجم الفاصل بين اللوحين وهو مكان وجود المجال الكهربائي. وعند قسمة طرفي المعادلة على الحجم نحصل على عبارة للطاقة لكل وحدة حجم، أو على **كثافة الطاقة**:

الطاقة المختزنة لكل وحدة حجوم في المجال الكهربائي.

$$\text{كثافة الطاقة} = \frac{\text{PE}}{\text{volume}} = \tfrac{1}{2}\epsilon_0 E^2 \qquad \textbf{(11 – 17)}$$

تتناسب الطاقة الكهربائية المختزنة لكل وحدة حجوم في أي منطقة في الفضاء طرديًّا مع مربع المجال الكهربائي في تلك المنطقة. ولقد اشتققنا (المعادلة 17 – 11) للحالة الخاصة للمواسع متوازي اللوحين. ومع هذا، يمكن إثبات صحة المعادلة السابقة لأيّ منطقة في الفضاء تحتوي على مجال كهربائي. وبالفعل، سنستخدم هذه النتيجة عند مناقشتنا للإشعاعات الكهرومغناطيسية (فصل 22).

تأثير الصحة

تطبيق الفيزياء
تجنب الصدمة أو الحرق
رجفان القلب

يمكن للطاقة المختزنة في مواسع كبير أن تكون ضارّة فتسبب الحرق أو الصدمة. وأحد أسباب التحذير من لمس دائرة أو وضع اليد داخل أي جهاز إلكتروني هو الخوف من استمرار أحد المكثفات الداخلية بحمل شحنات بالرغم من انقطاع مصدر القدرة الخارجي. وفي المقابل، فإنّ أساس عمل جهاز إيقاف رجفان القلب هو مواسع يتمّ شحنه إلى فرق جهدٍ مرتفع. وتتميز النوبة القلبية بضربات قلب غير منتظمة تعرف بالانقباض البُطَيْنِيّ (أو القلبي). وينتج من ذلك عدم ضخ الدم بواسطة القلب إلى بقية الجسم بصورة مناسبة. وإذا استمرت هذه الحالة وقتًا طويلًا، فإنّ الوفاة حتمية. ويسبب تفريغ سريع وفجائي للشحنات خلال القلب من جهاز إيقاف الرجفان توقف القلب كليا، ليتبع ذلك عودة ضربات القلب إلى وضعها الطبيعي. ويُشحنُ جهاز ايقاف الرجفان إلى فولتية قد تصل إلى عدة آلاف فولت، ثمّ يفرغُ بسرعةٍ كبيرةٍ خلال القلب عن طريق زوج من الموصلات العريضة المسماة (المجاذيف) التي تسمحُ بانتشار التيّار خلال صدر المصاب (شكل 17 – 18).



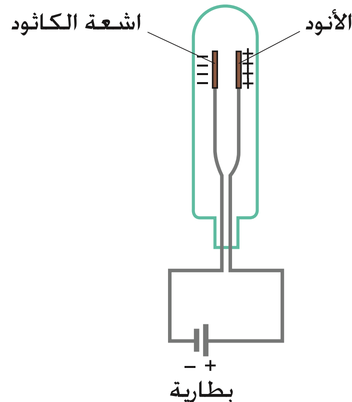
الشكل 17 - 18 إيقاف رجفان القلب

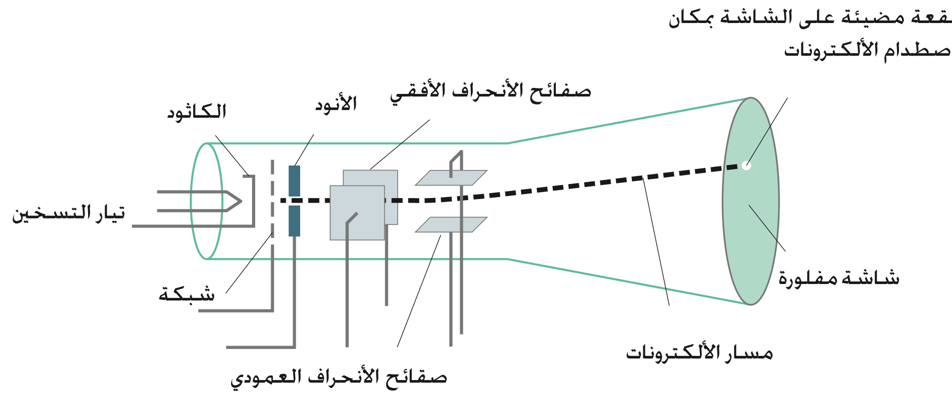
* 10-17 أنبوب الأشعة المهبطية: شاشات التلفاز والحاسوب وكاشف الذبذبات.

يُعدّ أنبوب الأشعة المهبطية (CRT) من الأجهزة المهمّة التي تستخدم الفولتيّة في أساس قياسها. وتسمح لنا برؤية "كيفية" تغير الفولتية مع الزمن. ويسمى أنبوب الأشعة المهبطية الذي يستخدم هذه الطريقة بكاشف الذبذبات. ويستخدم أنبوب الأشعة المهبطية منذ سنوات طويلة، كأنبوب الصور في التلفاز وشاشات الحواسيب بالرغم من تزايد الإقبال على استخدام شاشات أُخرى مختلفة ومن ضمنها شاشة البلورة السائلة (LCD).

ويعتمد عمل *CRT* على ظاهرة **الانبعاث الأيوني الحراري** التي اكتشفها توماس أديسون (1847 – 1931). خذ بالحسبان لوحين صغيرين (إلكترودين) داخل "أنبوب" أو "زجاجة مصباح" مفرغ كما هو مبين في (الشكل 17 – 19) بحيث يخضعان لفرق جهد ما، علماً بأنه يُطلق اسم **الكاثود** على القطب الكهربائي (الإلكترود) السالب، أما الأنود فيطلق على القطب الكهربائي (الإلكترود) الموجب. وعند تسخين الكاثود السالب (باستخدام تيار كهربائي في العادة كما في المصباح الضوئي) يصبح مشعًا، وتبدأ عندها الشحنات السالبة بمغادرة الكاثود والانسياب إلى الأنود الموجب. وتُدعى هذه الشحنات السالبة في وقتنا الحالي بالإلكترونات بعد أن كانت تُدعى سابقًا **بأشعة الكاثود** لأنّها تصدر من الكاثود (انظر (البند 27 – 1) حول اكتشاف الإلكترون).

الشكل 17 - 19 عند تسخين الكاثود داخل الأنبوب الزجاجي المفرغ (بواسطة تيار كهربائي غير ظاهر) ستنطلق أشعة كاثود مشحونة بشحنة سالبة (إلكترونات) منه، وتنساب باتجاه الأنود (+) التي ستنجذب إليه.

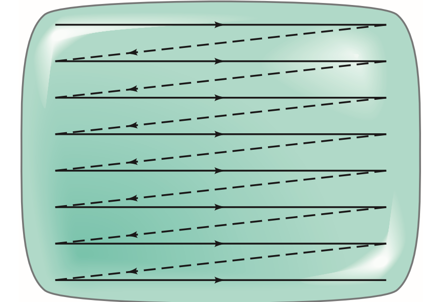




الشكل 17 - 20 أنبوب الأشعة المهبطية. عادةً ما تستخدم ملفات الانحراف المغناطيسي بدلاً من ألواح الانحراف الكهربائية الظاهرة هنا. وقد تمّت المبالغة في المواضع النسبية لعناصر الأنبوب للإيضاح.

تطبيق الفيزياء
CRT

يشتقُّ أنبوب الأشعة المهبطية (*CRT*) اسمه من حقيقة أنّ حزمةً من أشعة الكاثود (الإلكترونات) داخل أنبوب زجاجي مفرغ توجه إلى أجزاء مختلفة من الشاشة لتوليد "صورة" ما. ويظهر (شكل 17 – 20) مخطّطًا بسيطًا لـ CRT. وتسرّعُ الإلكتروناتُ المنبعثة من الكاثود الساخن بواسطة فرق جهد (5000–50,000 V) مؤثر (موصول) بين الأنود والكاثود. وتمرّ هذه الإلكترونات من "مُسدّس أو قاذف الإلكترونات" خلال ثقب صغير داخل الأنود. ويشعّ سطح الأنبوب الداخليّ المطليّ بطبقةٍ رقيقةٍ من مادّةٍ متلألئةٍ عندما تصطدم بها الإلكترونات. ويصبح موضع اصطدام الحزمة الإلكترونية على الشاشة نقطة مضيئة صغيرة واضحة للعيان. ويستطيع لوحان أفقيان ولوحان رأسيان تغيير مسار الحزمة الإلكترونية نتيجة خضوعها لفولتية ما. وتنحرف الإلكترونات بصورة مؤكدة باتجاه اللوح الموجب. وعند تغيير الفولتية على ألواح الانحراف يتغير موقع النقطة المضيئة. وبذلك يمكن إضافة أيّ نقطة على الشاشة. وتُستخدم ملفاتُ الانحراف المغناطيسية في كثير من أنابيب CRT (الفصل 20) بدلاً من الألواح الكهربائية.



شكل **17 - 21** تمسح الحزمة الإلكترونية عرض الشاشة في خطوط أفقية متتالية. ويُمسح كل خط أفقي بتطبيق فولتية مختلفة على ألواح الانحراف الأفقية. ثم تُزاح الحزمة الإلكترونية نحو الأسفل مسافة قصيرة نتيجة تطبيق تغير بسيط في الفولتية على ألواح الانحراف الرأسية، ومن ثم تعاد العملية كلها بعد ذلك.

وقد صُمّمت الشاشة أو أنبوب عرض الصور في الحاسوب أو في جهاز التلفاز بحيث تمسحُ الحزمة الإلكترونية الشاشة بالطريقة الظاهرة في (الشكل 17- 21) نتيجة تغيير الفولتية الموصلة بألواح الانحراف. وهناك 525 خطًّا في جهاز التلفاز العادي في الولايات المتحدة الأمريكية تشكل مسحًا كاملًا للشاشة خلال $\frac{1}{30}$ s. ويزود التلفاز عالي – التعريف (*HD – TV*) ضعف هذا الرقم من الخطوط بما ينعكس على جودة الصورة ونقائها. ونحن نرى الصورة؛ لأنّ الشاشة المتلألئة أبقتها (وكذلك أعيننا) لمدة $\frac{1}{20}$ s. وتتكون الصورة التي نراها من نقاط متفاوتة الإضاءة على الشاشة التي تتحكم بها شبكة (قطب كهربائي "نفّاذ" مثل الشبكة السلكية التي تسمح بمرور الإلكترونات). وتحدّ الشبكة من انسياب الإلكترونات بواسطة الفولتية ("إشارة الفيديو") المؤثرة فيها؛ كلما ازدادت سالبية الفولتية طرد عددٌ أكبرٌ من الإلكترونات، ومرّ عددٌ أقل من خلالها. وتصاحب إشارة الفيديو المُرسَلة بواسطة محطة التلفاز والمُستقبلة من قبل جهاز التلفاز إشارات أخرى توافق فولتية الشبكة مع المسحين الأفقي والعمودي.

تطبيق الفيزياء
شاشات تلفاز وحاسوب

ويعد كاشف التذبذب جهاز التكبير والقياس والملاحظة العينية للإشارة الكهربائية (ويقصد بالإشارة عادةً الفولتية المتغيرة مع الزمن) على شاشة الـ CRT. وتُمسح الحزمة الإلكترونية أفقيًّا بمعدل منتظم خلال الزمن بواسطة ألواح الانحراف الأفقية. وتؤثر الإشارة المراد عرضها (بعد تكبيرها) في ألواح الانحراف الرأسية. ويمثل "الأثر" المرئي على الشاشة مخطط الإشارة الفولتية (رأسيًّا) بالنسبة إلى الزمن (أفقيًّا) سواء كان هذا مخطّطًا كهربائيًّا للقلب (ECG) (شكل 17 – 22) أو كان إشارة من تجربةٍ للإيصال العصبي.

تطبيق الفيزياء
كاشف الذبذبات



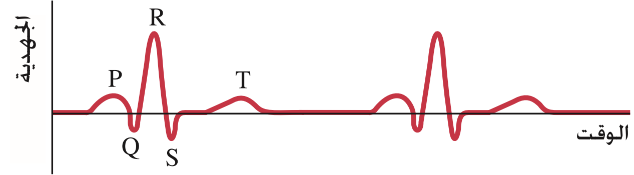
الشكل **17 - 22** عرض مخطط كهربائي للقلب (ECG) على CRT.

* 11-17 مخطط كهربائي للقلب (ECG أو EKG)

يمكن الكشف عن التغيّر في الجهد الكهربائي الناتج من سطح القلب بعد كلِّ نبضةٍ عن طريق موصلات فلزية تُسَمّى "الإلكترودات" موصولة بالجلد. ويجب أن يتمّ تضخيم التغير الصغير في الجهد والذي هو على مستوى ميللي فولت (mV). ويمكن إظهار هذه التغيرات على ورقة بواسطة مسجل ورقي أو شاشة (CRT)كما هو في (الشكل 17 – 22). يُعدّ المُخَطَّطُ الكهربائيُّ للقلب (*ECG* أو *EKG*) سجلًا للتغيّرات الجهديّة لقلب شخصٍ ما. ويظهر (الشكل 17 – 23) مثالًا على ذلك. وتُسَمّى الآلةُ المُخَطِّطَ الكهربائيّ للقلب. ونحن نهتمّ هنا بمصدر هذه التغيرات في الجهد وعلاقتها بنشاط القلب، وليس بإلكترونيات الجهاز.

تطبيق الفيزياء

المخطط الكهربائي للقلب



الشكل 17-23
مخطط كهربائي للقلب (ECG أو EKG)
يظهر في الشكل نبضتان.

وتمتلك كلّ من خلايا العضلات والخلايا العصبية طبقة من التناقطبي الكهربائية على امتداد جدران الخلايا؛ أي أنّه في الوضع الطبيعي هناك شحنات موجبة صافية على السطح الخارجي، وشحنات سالبة صافية على السطح الداخلي كما هو مبين في (الشكل 17 – 24 أ). ويعتمد مقدار الشحنة على حجم الخلية وهو تقريباً $10^{-3}\ C/m^2$ من السطح. ولخلية مساحة سطحها $10^{-5}\ m^2$ فإنّ الشحنة على أيّ من سطحيها $\approx 10^{-8}\ C$. وقبل انقباض عضلات القلب مباشرةً، تحدث تغيرات في جدران الخلية لتستطيع عندها الأيونات الموجبة الموجودة على السطح الخارجي للخلية من المرور خلال جدرانها لتعادل تلك الأيونات في الداخل، أو لتجعل السطح الداخلي موجباً أكثر بمقدار ضئيل جداً مقارنة مع السطح الخارجي كما هو مبين في (شكل 17 – 24 ب).

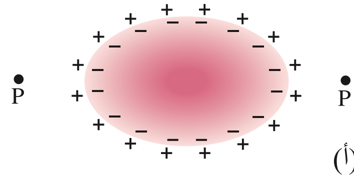
وتبدأ عملية "زوال الاستقطاب" من أحد أطراف الخلية، وتستمر باتّجاه الطرف المعاكس كما هو مبين بالسهم إلى أن تُصبح العضلة كلها غير مستقطبة، ثم تعود العضلة لتُستقطب كما كانت أولاً (شكل 17 – 24 أ). ويحدث هذا كلّه في أقل من ثانية واحدة. ويظهر (الشكل 17– 24 جـ) رسومات تقريبية للجهد V كدالة في الزمن عند النقطتين P و P′ (على جانبي الخلية) خلال تقدم انعدام الاستقطاب خلال الخلية. إنّ مسار انعدام الاستقطاب خلال القلب ككل أكثر تعقيداً، وينتج فرق جهد أكثر تعقيدًا كدالة في الزمن (شكل 17 – 23).

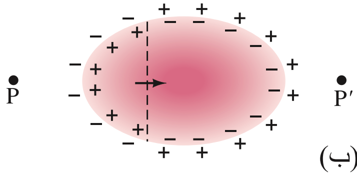
إنّ تقسيم المخطط الكهربائي للقلب إلى مناطق تعود إلى الانحرافات (أو الأمواج) المختلفة كما هو ظاهر في (الشكل 17 – 23) من الممارسات العادية. ويمثل كل انعكاس نشاط جزء معين من نبضة القلب (شكل 10 – 42). وتُمثل موجة P انقباضا أذينيا. وتمثل مجموعة QRS الانقباض البطيني نتيجة اتباع زوال الاستقطاب مسارًا معقداً جدًّا. وتمثل الموجة T تماثل القلب (إعادة استقطابه) للتحضير للدورة التالية.

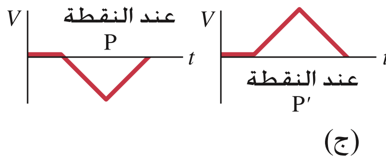
ويستخدم المخطط الكهربائي للقلب ثلاثة إلكترودات أساسية، حيث يوضع إلكترودان على "جانبي القلب" أي على الأيدي، ويوضع إلكترود على القدم اليسرى. وفي بعض الأحيان يوضع ستة إلكترودات إضافية في أماكن أخرى. ويزودنا قياس فروق الجهد المختلفة بمعلومات إضافية (وبعضها مكرر). وبما أنّ القلبَ جسمٌ ثلاثي الأبعاد يحدث فيه زوال الاستقطاب، فإنّ المخطط الكهربائي للقلب قد يتطلب 12 مخططًا ليصبح كاملا.

ويمثل ECG أداةً فاعلة جدًّا في تحديد اختلالات القلب. وعلى سبيل المثال، فإنّ الجانب الأيمن للقلب سيتضخم إذا أُجبر البطين الأيمن للدفع ضد حمل كبير غير اعتيادي (هذا ما يحدث عند انسداد الأوعية الدموية أو تيبسها). ويمكن ملاحظة هذه المشكلة عن طريق ECG عند اتساع الموجة S (بالسالب) وكبرها. ويمكن أيضًا كشف الانغلاقات، وهي المناطق الميتة في عضلة القلب، والناتجة من النوبات القلبية بواسطة ECG نتيجة عكسها لموجة زوال الاستقطاب.

الشكل 17 - 24 خلايا عضلة القلب تظهر (أ) طبقة شحنة قطبية في وضع الاستقرار. (ب) تطور زوال استقطاب خلية عند الانقباض العضلي. (جـ) الجهد V عند النقطتين P و P′ كدالة في الزمن.







ملخص

يُعرف **الجهد الكهربائي** V عند أيّ نقطة في الفضاء بطاقة الوضع الكهربائية لكلّ وحدة شحنات:

$$V_a = \frac{PE_a}{q} \quad (2-17 \text{ أ})$$

يُعرف **فرق الجهد الكهربائي** بين أيّ نقطتين بالشغل المبذول لتحريك 1 C من الشحنة الكهربائية بين هاتين النقطتين. ويقاس فرق الجهد بالفولت $(1\,V = 1\,J/C)$ ويُسَمّى في بعض الأحيان بـ **الفولتية**.

التغير في طاقة الوضع الناتجة من حركة شحنة q خلال فرق جهد V_{ba} هو:

$$\Delta PE = qV_{ba} \quad (3-17)$$

ويُعطى فرق الجهد V_{ba} بين نقطتين أ و ب بوجود مجال كهربائي منتظم كالتالي:

$$V_{ba} = -Ed \quad (4-17 \text{ أ})$$

حيث تمثل d المسافة الفاصلة بين النقطتين.

النقاط جميعها على **خط** (أو سطح) **تساوي الجهد** لها الجهد نفسه. ويتعامد الخط (أو السطح) مع المجال الكهربائي عند النقاط جميعها.

يعطى الجهد الكهربائي عند الموضع P الناتج من شحنة نقطية واحدة Q بالنسبة إلى الجهد الصفري في مالانهاية كالتالي:

$$V = \frac{kQ}{r} \quad (5-17)$$

حيث r تمثل المسافة Q إلى الموضع P.

[* يتناقص الجهد الناتج من **ثنائي القطب الكهربائي** مع $1/r^2$. ويساوي **عزم ثنائي القطب** $p = Ql$. إذ تمثل l المسافة الفاصلة بين الشحنتين المتساويتين بالمقدار Q والمختلفتين في الإشارة].

المكثف: جهاز يستخدم لتخزين الشحنة (والطاقة الكهربائية) ويتكون من موصلين غير متلامسين يمكنهما الاحتفاظ بمقدار متساوٍ من الشحنات المختلفة في الإشارة Q. وتُسَمّى النسبة بين هذه الشحنة إلى فرق الجهد V بين اللوحين بالسعة C.

$$Q = CV \text{ أو } C = \frac{Q}{V} \quad (7-17)$$

وتتناسب سعة المكثف ذي اللوحين المتوازيين طرديًّا مع مساحة كلّ لوح، وعكسيًّا مع المسافة الفاصلة بينهما:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (8-17)$$

وتحتوي المسافة الفاصلة بين اللوحين الموصلين للمواسع على مادة عازلة كهربائياً كالهواء، أو الورق، أو البلاستيك. ويشار إليها بـ **"العوازل الكهربائية"** وتتناسب السعة طرديًّا مع خواص العوازل الكهربائية المسماة بـ **ثابت العازل الكهربائي** K (وهي تقارب 1 للهواء). ويختزن المكثف المشحون كمية من الطاقة الكهربائية تعطى كالتالي :

$$PE = \tfrac{1}{2}QV = \tfrac{1}{2}CV^2 = \tfrac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \quad (10-17)$$

ويمكن النظر إلى هذه الطاقة على أنّها مختزنة في المجال الكهربائي بين اللوحين.

وكثافة الطاقة المختزنة في المجال الكهربائي E (الطاقة لكلِّ وحدة حجم) هي :

$$\frac{PE}{\text{الحجم}} = \tfrac{1}{2}\epsilon_0 E^2 \quad (11-17)$$

[* تستخدم شاشات التلفاز والحاسوب عادة **أنابيب الأشعة المهبطية** (CRT) التي تسرع الإلكترونات بواسطة جهد عالٍ، حيث تمسح الشاشات بطريقة منتظمة باستخدام ألواح انحراف].

[* يسجل **المخطط الكهربائي للقلب** (EKG أو ECG) التغيرات في الجهد (بدلالة mV) لكل نبضة قلب نتيجة زوال الاستقطاب وإعادة الاستقطاب للخلايا وتعرض هذه التغيرات على شاشة أو على جهاز تسجيل ورقي].

أسئلــــة

1. إذا كانت نقطتان لهما الجهد نفسه، فهل يعني هذا عدم الحاجة إلى بذل أيّ شغل لنقل شحنة اختبار من نقطة إلى أخرى؟ وهل يعني هذا عدم ضرورة لوجود قوة؟ وضح إجابتك.

2. هل ستتحرك شحنة سالبة ساكنة في مجال كهربائي باتجاه منطقة الجهد العالي، أم باتجاه منطقة الجهد المنخفض؟ وماذا بشأن شحنة موجبة؟ وكيف ستتغير طاقة الوضع للشحنة في كل حالة؟

3. اذكر بوضوح الفرق بين: (أ) الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي . (ب) الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائي.

4. إذا سُرّع إلكترون بواسطة فرق جهد مقداره 0.10 V، فما مقدار سرعته النهائية إذا سُرّع بواسطة أربعة أضعاف الفولتية السابقة؟ وضح إجابتك.

5. هل هناك نقطة ينعدم عندها المجال الكهربائي على امتداد الخط الفاصل بين شحنتين نقطيتين متساويتين؟ أين ينعدم الجهد الكهربائي؟ وضح إجابتك.

6. هل يمكن لجسم الانتقال من منطقة جهد منخفض إلى منطقة جهد مرتفع ومع هذا تنخفض طاقة وضعه؟ وضح إجابتك.

7. قارن بين الطاقة الحركية المكتسبة بواسطة البروتون $(q = +e)$ مع الطاقة المكتسبة لجسيم ألفا $(q = +2e)$ المتسارعة بفرق الجهد نفسه.

8. إذا كان $V = 0$ عند نقطة ما في الفضاء فهل يجب أن تكون $\vec{E} = 0$؟ وإذا كانت $\vec{E} = 0$ عند نقطة ما، فهل يجب أن تكون $V = 0$ عند تلك النقطة؟ وضح إجابتك، وأعط أمثلة لكل حالة.

9. هل يمكن لخطين متساويي الجهد أن يتقاطعا؟ وضح إجابتك.

10. ارسم عدة خطوط تساوي جهدا على (الشكل 16 – 31 ب).

*** 11.** ماذا يمكنك أن تقول عن المجال الكهربائي في منطقة في الفضاء ينتظم خلالها الجهد؟

12. يدور قمر صناعي حول الأرض على امتداد خط تساوي جهد الجاذبية. ما شكل المدار؟

13. عندما نتعامل مع أجهزة عملية، غالباً ما نعد جهد الأرض صفرًا. وإذا اعتبرنا جهد الأرض عند −10V، فكيف سيؤثر هذا في: (أ) الجهد V؟ (ب) المجال الكهربائي E عند النقاط الأخرى؟

14. لماذا يكتسب لوحا مواسع الشحنات نفسها عند وصلهما ببطارية؟ وهل سيبقى هذا صحيحاً إذا اختلف اللوحان في الشكل أو الحجم؟

15. لقد رأينا أن السعة C تعتمد على الحجم، والشكل، وموضع كلٍّ من الموصلين، بالإضافة إلى ثابت العازل الكهربائي K. فماذا نعني عندما نقول بأن C ثابتة في (المعادلة 17 – 7)؟

مسائل

17 – 1 إلى 17 – 4 الجهد الكهربائي

.1 (I) ما مقدار الشغل الذي يبذله المجال الكهربائي عند نقل شحنة سالبة مقدارها $-7.7\,\mu C$ a من الأرض إلى نقطة جهدها أعلى بمقدار $+55$ V؟

.2 (I) ما مقدار الشغل الذي يبذله المجال الكهربائي عند نقل بروتون من نقطة جهدها $+125$ V إلى نقطة جهدها -55 V؟ اذكر إجابتك بدلالة الجول والإلكترون فولت.

.3 (I) ما مقدار الطاقة الحركية التي سيكتسبها الإلكترون (بدلالة الجول والإلكترون فولت) إذا تم تسريعه خلال فرق جهد مقداره 23,000 V في أنبوب عرض الصور في تلفاز؟

.4 (I) يكتسب إلكترون طاقة حركية مقدارها 7.45×10^{-16} J عند تسريعه بواسطة مجال كهربائي من لوح أ إلى لوح ب. ما فرق الجهد بين اللوحين؟ وأي اللوحين ذو جهد أعلى؟

.5 (I) ما شدة المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين يفصل بينهما 5 8 mm إذا كان فرق الجهد بينهما 220 V؟

.6 (I) ما مقدار الفولتية الضروري تطبيقها بين لوحين متوازيين يفصلهما مسافة 11.0 mm للحصول على مجال كهربائي مقداره 640 V/m؟

.7 (I) ما المسافة الفاصلة بين لوحين متوازيين موصولين ببطارية فرق جهدها 45-V، وكان المجال الكهربائي الناتج منها بين اللوحين يساوي 1500 V/m؟

.8 (I) ما فرق الجهد الضروري لإعطاء نواة هيليوم 65.0 keV ($Q = 2e$) من الطاقة الحركية؟

.9 (II) يفصل الهواء بين لوحين متوازيين موصولين بمصدر لفرق الجهد 200 V. ما أصغر مسافة فاصلة ممكنة بين اللوحين (ما سمك الهواء) لازمة لعدم وصول الهواء إلى نقطة الانهيار (أي عندما يصبح الهواء موصلاً) علماً بأن أقصى مجال ينهار بعده الهواء هو $E = 3 \times 10^{6}$ V/m

.10 (II) إذا كان الشغل المبذول بواسطة قوة خارجية لنقل شحنة سالبة مقدارها $-8\,50\,\mu C$ من نقطة أ إلى نقطة ب يساوي 15.0×10^{-4} J. وإذا بدأت الشحنة حركتها من السكون لتصل طاقتها الحركية إلى 4.82×10^{-4} J عند النقطة ب. فما فرق الجهد بين النقطتين أ و ب؟

.11 (II) ما سرعة الإلكترون إذا كانت طاقته الحركية تعادل: (أ) 750-eV. (ب) 3.2-keV.

.12 (II) ما سرعة البروتون إذا كانت طاقته الحركية تعادل 3.2 keV.

.13 (II) ما سرعة جُسيم ألفا (وهو عبارة عن نواة هيليوم: $Q = +2e$، $m = 6.64 \times 10^{-27}$ kg) لحظة انبعاثه خلال تحلّل إشعاعي مع طاقة حركية مقدارها $\text{KE} = 5.53$ MeV؟

17 – 5 الجهد الناتج من الشحنات النقطية

.14 (I) ما الجهد الكهربائي الناتج على بعد 15.0 cm من شحنة نقطية مقدارها $4.00\,\mu C$؟

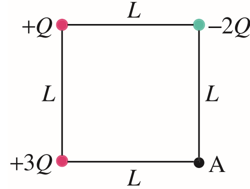
.15 ما الشحنة النقطية التي تولد فرق جهد مقداره $+125$ V على بعد 15 cm؟

.16 (II) شحنتان متماثلتان، مقدار كلٍّ منهما $+35\,\mu C$ تفصلهما مسافة 32 cm. ما الشغل الضروري لنقل شحنة اختبار مقدارها $+0.50\,\mu C$ من منتصف المسافة بينهما إلى نقطة تبتعد مسافة 12 cm أقرب إلى أي منهما؟

.17 (II) ارسم موصِّلًا على شكل ملعب كرة قدمٍ، وافترض أنّ هذا الموصل يحمل شحنة سالبة $-Q$. وارسم 12 خطَّ مجالٍ كهربائيٍّ وخطّي تساوي جهد.

.18 (II) (أ) ما مقدار الجهد الكهربائي على بعد 2.5×10^{-15} m من بروتون؟(ب) ما طاقة الوضع الكهربائية للنظام المكون من بروتونين يفصل بينهما 2.5×10^{-15} m كما يمكن أن يحدث داخل أي نواة؟

.19 (II) ما الجهد عند النقطة أ (الزاوية الرابعة في المربع ذي الضلع L) إذا علمت أن ثلاث شحنات وضعت على رؤوس الزوايا الباقية كما في (الشكل 17 – 25)؟ افترض أنّ $V = 0$ عند مسافة بعيدة جداً .



الشكل **17 - 25** (مسألة 19).

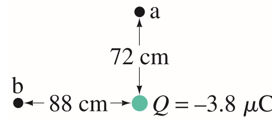
.20 (II) يبدأ إلكترون بالحركة من السكون على بعد 32.5 cm من شحنة نقطية ثابتة مقدارها $Q = -0.125\,\mu C$. ما سرعة الإلكترون عند ابتعاده كثيراً؟

.21 (II) شحنتان نقطيتان متماثلتان $+9.5\,\mu C$ تفصلهما - مبدئياً - مسافة 3.5 cm عن بعضهما بعضا. ما السرعة التي ستتحرك بها كل منهما مبتعدةً عن الأخرى إذا تركتا لتتحركا من السكون؟ افترض أنّ كتلة كلٍّ منهما المتماثلة هي 1.0 mg.

.22 (II) وضعت شحنتان نقطيتان $3.0\,\mu C$ و $-2.0\,\mu C$ على مسافة 5.0 cm من بعضهما بعضا على المحور السيني (x). ما النقاط على امتداد المحور السيني التي سينعدم عندها : (أ) المجال الكهربائي. (ب) الجهد الكهربائي؟ افترض أن $V = 0$ عند $r = \infty$.

.23 (II) ما الشغل اللازم بذله لإحضار ثلاثة إلكترونات من مسافة بعيدة جداً إلى مسافة 1.0×10^{-10} m من بعضهم بعضًا (عند رؤوس زوايا مثلث متساوي الأضلاع)؟

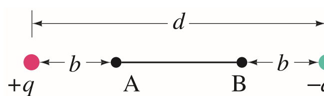
.24 (II) افترض أنّ النقطة أ تبتعد مسافة 72 cm إلى الشمال من شحنة نقطية سالبة، ($-3.8\,\mu C$) وأن النقطة ب تبتعد مسافة 88 cm إلى الغرب من الشحنة (شكل 17 – 26). حدد (أ) $V_{ba} = V_b - V_a$. و(ب) $\vec{E}_b - \vec{E}_a$ (قيمة واتجاهاً).



شكل **17 - 26** (مسألة 24).

.25 (III) ما مقدار الفولتية الضروري استخدامه لتسريع بروتون (نصف قطره 1.2×10^{-15} m) ليكتسب طاقة حركية كافية لاختراق نواة سيليكون؟ تحتوي نواة السيليكون على شحنة تعادل $+14e$ ونصف قطرها حوالي 3.6×10^{-15} m. افترض أن الجهد لشحنات نقطية .

.26 (III) يظهر (الشكل 17 – 27) شحنتين نقطيتين متساويتين بالمقدار ومتعاكستين بالإشارة. يفصل بينهما مسافة d. حدد معادلة لـ $V_{BA} = V_B - V_A$ للنقاط B و A على امتداد الخط الفاصل بين الشحنتين.



الشكل **17 - 27** (مسألة 26).

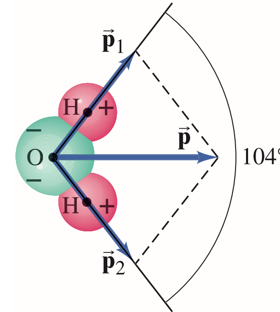
27. (III) يدور إلكترون حول البروتون (النواة) في مدار دائري نصف قطره 0.53×10^{-10} m حسب نموذج "بور" لذرّة الهيدروجين. (أ) ما الجهد الكهربائي عند مدار الإلكترون الناتج من البروتون؟ (ب) ما الطاقة الحركية للإلكترون؟ (جـ) ما طاقة الإلكترون الكلية في مداره؟ (د) ما طاقة التأيّن؛ أي الطاقة الضرورية لإزالة الإلكترون من الذرة ونقله إلى $r = \infty$ ساكناً؟ عبّر عن النتائج بدلالة الجول والإلكترون فولت.

* 17 – 6 الثناقطبي الكهربائي

*28. (I) ما عزم الثناقطبي لإلكترون وبروتون ساكنين يفصلهما عن بعضهما مسافة 0.53×10^{-10} m؟

*29. (II) احسب فرق الجهد الناتج من ثناقطبي ذي عزم مقداره 4.8×10^{-30} C عند نقطة تبتعد مسافة 1.1×10^{-9} m إذا كانت هذه النقطة: (أ) على امتداد محور الثناقطبي بالقرب من الشحنة الموجبة. (ب) °45 فوق المحور بالقرب من الشحنة الموجبة. (جـ) °45 فوق المحور ولكن أقرب إلى الشحنة السالبة.

*30. (III) يُشير عزم الثناقطبي كمتجه من الشحنة السالبة إلى الشحنة الموجبة. في جزيء الماء كما في (الشكل 17 – 28) حيث له عزم ثناقطبي $\vec{p}$ والذي يمكن اعتباره الجمع الاتجاهي لعزمي الثناقطبي $\vec{p}_1$ و $\vec{p}_2$ كما هو مبين. والمسافة الفاصلة بين كل من H و O حوالي 0.96×10^{-10} m. حدد الشحنة q على كل ذرة H إذا علمت أن الخطين اللذين يصلان مركز الذرة O مع كل من ذرتي H يصنعان زاوية مقدارها °104 كما هو مبين. وأن محصلة عزم الثناقطبي يساوي $p = 6.1 \times 10^{-30}$ C·m.



الشكل **17 - 28**
(مسألة 30).

17 – 7 المكثفات

31. (I) يحتفظ لوحا مواسع على $+2500\ \mu$C و $-2500\ \mu$C عندما كان فرق الجهد بينهما 850 V. فما سعة المكثف؟

32. (I) ما الفولتية بين طرفي مواسع سعته 9500-pF عندما يحتفظ بشحنة مقدارها (موجب وسالب) 16.5×10^{-8} C؟

33. (I) إذا كان فرق الجهد بين جزأين قصيرين من أسلاك متوازية في الهواء 120 V فما سعة السلكين عندما يحتفظان بشحنة متماثلة بالمقدار (95 pC) ومختلفة بالإشارة؟

34. (I) ما مقدار الشحنة التي تنساب من قطبي بطارية مصنفة 12.0-V عندما يتم وصلها بمواسع سعته 7 00-μF؟

35. (I) ما مساحة لوحي مواسع سعته 0.20-F إذا كانت المسافة الفاصلة بينهما 2.2-mm من الهواء؟

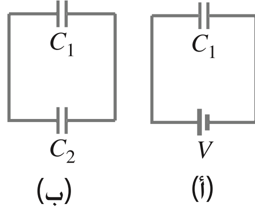
36. (II) ما سعة مواسع عندما تزداد شحنته بمقدار 18 μC لازدياد فولتيته من 97 V إلى 121 V.

37. (II) ما الشحنة الضروري وجودها على كل لوح من لوحي المكثف إذا كان المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين هو 8.50×10^{5} V/m، ومساحة كل لوح $35.0\ cm^2$، ويفصل بينهما طبقة من الهواء سمكها 2.45 mm؟

38. (II) ما مساحة كل لوح من لوحي المكثف إذا كانت قيمة الشحنة على كل لوح 5.2 μC، والمجال الكهربائي بين اللوحين 2.0 kV/mm؟

39. (II) ما شدة المجال الكهربائي بين لوحي مواسع سعته 0.80-μF سمك طبقة الهواء خلاله تساوي 2.0 mm، وقيمة الشحنة على كل لوح من لوحيه تساوي 72 μC؟

40. (III) تمّ شحن مواسع سعته 7.7-μF بواسطة بطارية فرق جهدها 125-V (شكل 17 – 29 أ) ثم أبعدت البطارية عنه. وعندما وُصل هذا المكثف (C_1) (شكل 17 – 29 ب) إلى مواسع أخر C_2 غير مشحون مبدئياً أصبحت الفولتية على كل مواسع هي 15 V. فما قيمة C_2؟ [تلميح: الشحنة محفوظة].



شكل **17 - 29**
(مسألة 40 و 52).

41. (III) شُحن مواسعان سعة أحدهما 2.50-μF، وسعة الآخر 6.80-μF إلى 857 V و 652 V على التوالي، ثم فصلا عن بطاريتهما. ثم وصُلت أقطابهما الموجبة ببعضها والسالبة ببعضها بعضا. فما فرق الجهد بين طرفي كل منهما؟ وما هي الشحنة عليهما؟ [تلميح: الشحنة محفوظة].

17 – 8 العوازل الكهربائية

42. (I) ما سعة لوحين مربعين متوازيين طول ضلع كلٍّ منهما 5.5 *cm*، ويفصل بينهما طبقة من البارافين سمكها 1.8 mm؟

43. (I) ما سعة لوحين دائريين نصف قطر كل منهما 5.0 cm، ويفصل بينهما طبقة من "المايكا" سمكها 3.2 mm؟

44. (II) وُصل مواسع سعته 3500-pF ببطارية فرق جهدها 22-V، ثمّ ملئ الهواء بين لوحيه بقطعة من "المايكا". فما مقدار الشحنة التي ستنساب من البطارية؟

*45. (II) يعادل المجال الكهربائي بين لوحي مواسع وضعت داخله ورقة (K = 3.75) 8.24 × 104 V/m. فإذا كانت المسافة الفاصلة بين لوحيه 1.95 mm والشحنة على أحد لوحيه 0.775 μC، فحدد سعة هذا المكثف ومساحة كل لوح؟

17 – 9 تخزين طاقة كهربائية

46. (I) ما مقدار الطاقة المختزنة الناتجة من تطبيق 650 V على مواسع سعته 2200-pF؟

47. (I) استخدم جهاز إيقاف ارتجاف القلب لصدم قلب ينبض بطريقة مضطربة. ما سعة مواسع هذا الجهاز إذا تم شحنه إلى 5.0 kV، وخزنت عليه طاقة مقدارها 1200 J؟

48. (II) ما مقدار الطاقة المختزنة في المجال الكهربائي بين لوحين مربعي الشكل إذا كان طول ضلع كل لوح 8.0 cm وسمك طبقة الهواء بينهما 1.5-mm؟ علماً بأن الشحنة على أحد اللوحين 420 μC.

49. (II) صُنع مواسع منزلي بوضع وعائي طهي قطر كل منهما 9-in على مسافة 5 cm من بعضهما بعضًا، وإيصالهما بقطبي بطارية ذات فرق جهد 9-V. قدّر: (أ) سعته. (ب) الشحنة على كل لوح (وعاء). (جـ) المجال الكهربائي عند منتصف المسافة بين اللوحين. (د) الشغل المبذول بواسطة البطارية لشحن اللوحين (هـ). أيّ من القيم السابقة سيتغير نتيجة إدخال مادة عازلة كهربائية بين اللوحين؟

50. (II) إذا كانت الشحنتان على مواسع متوازي اللوحين $+Q$ و $-Q$، ثم ضوعفت المسافة الفاصلة بين لوحيه: (أ) ما معامل تغير الطاقة المختزنة في المجال الكهربائي؟ (ب) ما الشغل الضروري بذله لمضاعفة المسافة الفاصلة بين اللوحين من d إلى $2d$ علماً بأن مساحة كل لوح A؟

51. (II) كيف تتغير الطاقة المختزنة في المكثف إذا: (أ) تضاعف فرق الجهد. (ب) تضاعفت الشحنة على كل لوح. في حين لا يزال المكثف موصلاً في البطارية؟

52. (III) شحن مواسع سعته $2.70\ \mu F$ بواسطة بطاريّةٍ فرق جهدها 12.0-V. فإذا فُصِلت البطارية بعد ذلك، ثمّ وُصِل المكثف مع مواسع آخر غير مشحون سعته $4.00\text{-}\mu F$ كما في (الشكل 17 – 29)، فاحسب مقدار الطاقة الكلية المختزنة: (أ) قبل وصل المكثفين ببعضهما. (ب) بعد وصلهما. (جـ) ما التغير في الطاقة؟

*** 17 – 16 أنبوب الأشعة المهبطية**

*** 53.** (III) تتسارع الإلكترونات أفقيًّا بواسطة 7.0 kV داخل CRT ومن ثمّ تمرّ من خلال مجال كهربائي منتظم E لمسافة 2.8 cm فيعمل على انحرافها نحو الأعلى لتصل إلى أعلى الشاشة على بعد 22 cm جانباً و 11 cm فوق المركز. قدّر قيمة E.

*** 54.** تُسرع إلكترونات بواسطة 6.0 kV داخل CRT. إذا كان عرض الشاشة 30 cm. ما مدى تغير المجال الكهربائي المسبب للانحراف الأفقي لكي تمسح حزمة الإلكترونات عرض الشاشة كاملاً على بعد 34 cm من ألواح انحراف طولها 2.6-cm؟

مسائل عامة

55. يكتسب إلكترون يبدأ من السكون طاقة حركية تساوي 6.3 keV نتيجة حركته من النقطة أ إلى النقطة ب. (أ) ما مقدار الطاقة الحركية التي سيكتسبها الإلكترون عندما يتحرك من السكون عند النقطة ب إلى النقطة أ؟ (ب) حدد النسبة بين السرعتين عند نهاية مسار كل منهما؟

56. ينقل ضوء البرق C 4.0 من الشحنات و 4.2 MJ من الطاقة إلى الأرض. (أ) ما فرق الجهد المسؤول عن هذه العملية؟ (ب) ما مقدار الماء الممكن تبخيره باستخدام هذه الطاقة لو أن درجة حرارة الماء هي درجة حرارة الغرفة نفسها؟

57. ما مقدار الطاقة المختزنة لكل 150 V/m داخل المجال الكهربائي القريب من سطح الأرض؟

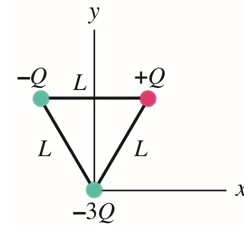
58. يتم تسريع الإلكترونات في أنبوب صور تلفاز بواسطة آلاف الفولتات خلال الفراغ. فهل يمكن للإلكترونات التحرك عكس اتجاه الجاذبية الأرضية لو أن الأنبوب وضع على ظهره على الأرض؟ وما فرق الجهد الضروري والمؤثر خلال مسافة 3.0 cm لمعادلة قوة الجاذبية على الأرض؟ وما فرق الجهد الضروري والمؤثر خلال مسافة 3.0 cm لمعادلة قوة الجاذبية نحو الأسفل والذي سيعمل على اتزان الإلكترون وبقائه ثابتاً؟ افترض أن المجال الكهربائي منتظم.

59. يختزن مواسع هائل سعته 4.0-F مقداراً كافياً من الطاقة لتسخين 2.5 kg من الماء من C 21° إلى C 95°. فما فرق الجهد بين لوحيه؟

60. وصل مواسع غير مشحون ببطارية فرق جهدها 24.0-V إلى أن شُحن تماماً ثم فصل عن البطارية. إذا أدخلت قطعة من البارافين بين لوحيه. فما هي الفولتية الناتجة بين اللوحين؟

61. ازدياد المجال الكهربائي من 3.0×10^6 V/m سيعمل على انهيار الهواء الجاف. ما مقدار الشحنات التي يمكن وضعها على مواسع متوازي اللوحين إذا كانت مساحة كل لوح $56\ cm^2$؟

62. وضعت ثلاث شحنات على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع (طول ضلعه L) كما هو موضح في (الشكل 17 – 30). حدد الجهد عند منتصف كل ضلع.

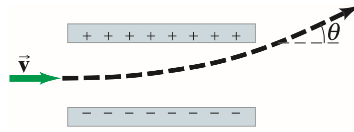


الشكل **17 - 30**. (مسألة 62).

63. وضعت شحنتان $3.4\ \mu C$ و $-2.6\ \mu C$ على بعد 1.6 cm من بعضهما بعضا على امتداد الخط الفاصل بينهما: أين سيختفي: (أ) المجال الكهربائي؟ (ب) الجهد الكهربائي؟

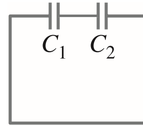
64. مُلىء مواسع سعته 2600-pF بالهواء. ووُصل ببطارية 9.0-V. إذا وضعت قطعة من زجاج البايركس بين لوحيه. فما مقدار الشحنات التي ستنساب من البطارية؟

65. سُرّعَ إلكترونٌ من السكون أفقياً داخل أنبوب صور تلفاز بواسطة فرق جهد يعادل 5500 V. ثمّ مُرّر بين لوحين أفقيين طول كل منهما 6.5 cm ويفصلهما مسافة 1.3 cm. إذا كان فرق الجهد بين اللوحين 250 V (شكل 17 – 31) فما الزاوية التي سيصنعها الإلكترون بعد خروجه من بين اللوحين؟



الشكل **17 - 31** (مسألة 65).

66. يحمل مواسع سعته C_1 شحنة Q_0. إذا وُصِلَ مباشرةً إلى مواسع آخر غير مشحون سعته C_2 كما في (الشكل 17 – 32)، فما شحنته عندئذ؟ وما فرق الجهد بين طرفي كل مواسع؟



الشكل **17 - 32**
(مسألة 66).

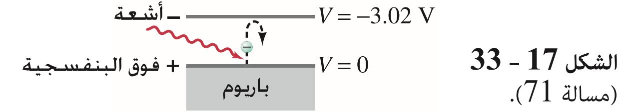
67. لكي تستطيع تخيل مقدار 1-F؛ افترض أن مساحة لوح مواسع مليء بالهواء هي $1.0\ cm^2$. احسب مقدار المسافة الضرورية بين اللوحين؟ هل يمكن تحقيق ذلك عملياً؟

68. يشير مجال كهربائي مقداره حوالي 150 V/m نحو الأسفل بالقرب من سطح الأرض. استخدم حفظ الطاقة لتحدد الفرق في سرعة كرتين كتلة كل منهما $m = 0.540$ kg لحظة اصطدامهما بالأرض بعد سقوطهما من ارتفاع 2.00 m إذا كانت شحنة إحداهما $q_1 = 650\ \mu C$ وشحنة الأخرى $q_2 = -650\ \mu C$؟

69. يمتلك مصدر قدرة ليزر نيتروجيني نبضي مواسعًا سعته $0.050\text{-}\mu F$ وفولتيته القصوى $30\,kV$. (أ) قدر كمية الطاقة الممكن تخزينها في هذا المكثف؟ (ب) ما قدرة الليزر النبضي إذا كان قادراً على تحويل 12% من طاقته الكهربائية المختزنة إلى طاقة ضوئية تستمر لمدة $8.0\mu C$؟

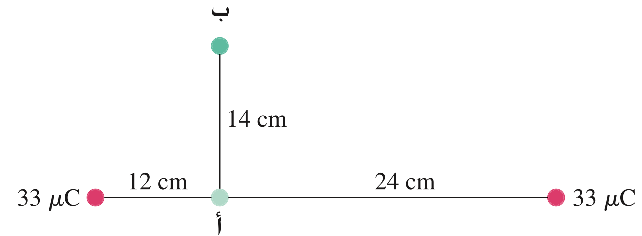
70. يمكن لفرق الجهد خلال العواصف البرقية أن يصل إلى $35{,}000{,}000\,V$ بين الأرض وأسفل الغيوم الرعدية على علو $1500\,m$ فوق سطح الأرض وبمساحة $110\,km^2$. اعتبر نظام الأرض – الغيم مواسع هائل واحسب: (أ) سعة نظام الأرض – الغيم. (ب) الشحنة المختزنة في "المكثف". (جـ) الطاقة المختزنة في "المكثف".

71. يزود الضوء فوق البنفسجي (UV) في الخلية الضوئية بعض الإلكترونات في فلز الباريوم طاقة كافية لتغادر السطح بسرعة عالية. انظر (الشكل 17 – 33). ولحساب طاقة الإلكترونات العظمى؛ تم إضافة لوح آخر فوق سطح الباريوم. وجُعل جهده سالباً لكي يبطيء الإلكترونات المنبعثة ويوقفها ومن ثم يرغمها على العودة باتجاه سطح الباريوم. فإذا كان جهد هذا اللوح الإضافي $-3.02\,V$ (بالنسبة إلى الباريوم) عندما توقفت أسرع الإلكترونات. فما سرعة هذه الإلكترونات لحظة انبعاثها من سطح الباريوم؟



الشكل 17 - 33
(مسألة 71).

72. وُضِعَتْ شحنةٌ نقطية مقدارها $+33\,\mu C$ على بعد $36\,cm$ من شحنة مماثلة مقدارها $+33\,\mu C$. ما التغير في طاقة الوضع الناتج من تحريك شحنة مقدارها $-1.5\,\mu C$ من النقطة "أ" إلى النقطة "ب" في (الشكل 17 – 34)؟



الشكل 17 - 34 (مسألة 72).

73. صُنع مواسع من قطعتين نقديتين فلزيتين قطر كلٍّ منهما $1.1\text{-}cm$ يفصل بينهما ورقةٌ سمكها $0.15\text{-}mm$ $(K = 3.7)$. ما مقدار الشحنة على كلِّ قطعة فلزية بعد وصل المكثف ببطارية فرق جهدها $12\text{-}V$؟

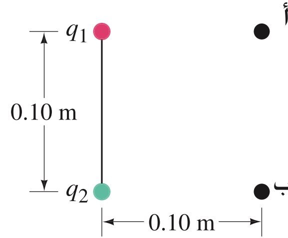
74. وُضعت شحنة مقدارها $+4.5\,\mu C$ على بعد $23\,cm$ على يمين شحنة أخرى مقدارها $-8.2\,\mu C$. احسب عند منتصف المسافة بين الشحنتين: (أ) مقدار الجهد. (ب) مقدار المجال الكهربائي؟

75. وُصل مواسع متوازي اللوحين مساحة أحد لوحيه $2.0\,cm^2$ وسمك الهواء الفاصل بينهما $0.50\,mm$ ببطارية $12\text{-}V$ ليشحن تماماً قبل أن تفصل عنه البطارية. (أ) ما هي الشحنة على المكثف. (ب) ما هي الشحنة على المكثف عندما تصبح المسافة بين اللوحين $0.75\,mm$؟ (جـ) ما فرق الجهد بين اللوحين؟ (د) ما الشغل الضروري لجعل المسافة $0.75\,mm$ بين اللوحين؟

76. شُحن مواسع تماماً بواسطة بطارية فرق جهدها $6.0\text{-}V$ ثم فُصلت البطارية عنه. بدأت الشحنات بالتسرب التدريجي من لوحي المكثف غير المثالي. احسب مقدار الشحنة الضائعة إذا علمت أن المكثف أصبح غير مشحونٍ في اليوم التالي مباشرة؟

77. ثُبتت شحنتان على بعد $4.0\,cm$ من بعضهما بعضًا. إذا كانت شحنتاهما $Q_1 = Q_2 = 5.0\,\mu C$ وكتلة كل منهما $m_1 = 1.5\,mg$ و $m_2 = 2.5\,mg$. (أ) ما سرعة الشحنة Q_1 بعد فترة زمنية كبيرة إذا تركت تتحرك من السكون؟ (ب) ما سرعة الشحنة Q_1 بعد فترة زمنية كبيرة إذا تركت الشحنتان لتتحرّكا من السكون؟

78. وُضعت شحنتان كما في (الشكل 17 – 35) حيث $q_1 = 1.5\,\mu C$ و $q_2 = -3.3\,\mu C$. أوجد فرق الجهد بين النقطتين "أ" و "ب".



الشكل 17 - 35
(مسألة 78).

إجابات التمارين

أ: (أ) $-8.0 \times 10^{-16}\,J$. (ب) $9.8 \times 10^{5}\,m/s$.
ب: $0.72\,J$.
جـ : $8.3 \times 10^{-9}\,C$.
د: (أ) 3 أضعاف أكبر. (ب) 3 أضعاف أكبر.
هـ: $12\,mF$.



توهّج فتيل السلك الدقيق للمصباح بسبب مرور التيار الكهربائي فيه. تتحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقةٍ حراريّةٍ (بوساطة التصادمات بين الإلكترونات المتحركة وذرات السلك) تجعل درجة حرارة السلك عاليةً جدًّا بحيث يتوهّج. إنّ التيّار الكهربائيّ والقدرة الكهربائيّة في الدارات الكهربائيّة ذات أهميّةٍ أساسيّةٍ في حياتنا اليوميّة. نتناول في هذا الفصل كلًّا من ac، و dc الذي يتضمّن التحليل دون المجهريّ للتيّار الكهربائيّ أيضًا.

الفصل 18

التيارات الكهربائية

درسنا في الفصلين السابقين الكهرباء الساكنة: شحنات كهربائية ساكنة. وفي هذا الفصل، سندرس الشحنات المتحركة. ونسمي تدفق الشحنة التيارَ الكهربائي.

في حياتنا اليومية، التيارات الكهربائية في الأسلاك والموصلات الأخرى مألوفة لنا. وبالفعل، فإنّ أغلب الأجهزة الكهربائية العملية تعتمد على التيار الكهربائي؛ ومن أمثلة ذلك التيار الذي يمر في المصباح، والتيار الذي يمر في عنصر التسخين للسخان الكهربائي، وكذلك التيار الذي يمر في الأجهزة الإلكترونية. ويمكن أن توجد التيارات الكهربائية أيضا في الموصلات كالأسلاك، وكذلك في الأجهزة الأخرى مثل (أنبوب الأشعة المهبطية) التلفاز أو شاشة الحاسوب الذي تتدفق فيه الإلكترونات المشحونة خلال الفراغ (البند 17-10).

في حالات الكهرباء الساكنة، لاحظنا في (البند 16 - 9) أنّ المجال الكهربائي يجب أن يكون صفرًا داخل الموصل (إن لم يكن كذلك فإنّ الشحنات تتحرك). ولكن عندما تتحرك الشحنات في موصل، يكون هناك مجالٌ كهربائيٌّ داخل الموصل عادة. وبالفعل، فإنّ المجال الكهربائي ضروريٌّ لجعل الشحنات تتحرك ولكي يبقيها متحركة في أي موصل طبيعي. ويمكن التحكم بتدفق الشحنة باستعمال المجال الكهربائي والجهد الكهربائي (الفولتية) وهي مفاهيم تمت مناقشتها سابقًا. ولكي يمرَّ تيارٌ في سلك؛ يجب أن يكون هناك فرق جهد بين طرفي السلك، ويمكن الحصول على هذا الفرق بوساطة بطارية.

في البداية، سوف ننظر إلى التيار الكهربائي من وجهة نظر عينيّة؛ أي التيّار كما يُقاس في مختبر. وسننظر لاحقا في هذا الفصل إلى التيارات من وجهة نظر مجهرية (نظريا) على أنّها تدفق للإلكترونات في سلك.

حتى عام 1800م، كان التطور التقني للكهرباء يتضمن بشكل أساسي توليد شحنة ساكنة بوساطة الاحتكاك. ولكن تغير ذلك كله في عام 1800 عندما اخترع أليساندرو فولتا (1827 - 1745؛ الشكل 18-1) البطارية الكهربائية التي تمكَّن من خلالها الحصول على أول تدفق ثابت للشحنة الكهربائية، أي تيار كهربائي ثابت.



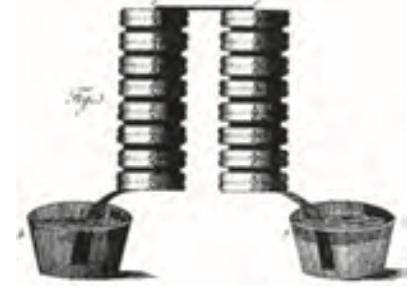
الشكل 18-1: أليساندرو فولتا. في هذه الصورة، يعرض فولتا بطاريته لنابليون في عام 1801م.

18-1 البطارية الكهربائية

إنّ الأحداث التي أدّت إلى اكتشاف البطارية مثيرة، ليس لأنّ هذا يُعَدُّ اكتشافًا مهمًّا فقط، ولكن لأنّه أحدث مناظرة علمية مشهورة أيضًا.

وفي الثمانينيات من القرن الثامن عشر، أجرى لويجي جلفاني وهو أستاذ في جامعة بولونا (1737-1798) سلسة من التجارب على تقلص عضلة رجل ضفدع من خلال مؤثر كهربائي انتج عن طريق كهرباء ساكنة. وجد جلفاني أنّ العضلة تتقلص أيضًا عند إدخال فلزين مختلفين في الضفدع. اعتقد جلفاني أن مصدر الشحنة الكهربائية كان عضلة الضفدع أو العصب نفسه، وأن الفلز يقوم بنقل الشحنة فقط إلى النقاط المناسبة. وعندما نشر بحثه في عام 1791 سمَّى هذه الشحنة بـ " كهرباء الحيوان". وتساءل الكثيرون بمن فيهم جلفاني نفسه: هل اكتشف ما كان مرجوًّا منذ أمدٍ طويلٍ " قوة الحياة".

أمّا فولتا الذي كان يعمل في جامعة بافيا على بعد 200 km فكان يشك في نتائج جلفاني، وبدأ يعتقد أن مصدر الكهرباء لم يكن في الحيوان نفسه، وإنما بسبب التلامس بين الفلزين المختلفين. أدرك فولتا أن الموصل الرطب مثل عضلة الضفدع أو الرطوبة عند نقطة التلامس بين فلزين مختلفين كان ضروريا في الدارة حتى تكون فاعلة. وفهم فولتا أيضا أن تقلص عضلة الضفدع كان بمثابة جهاز حساس للكشف عن الشدة الكهربائية أو القوة الدافعة الكهربائية (الكلمات التي كان يستخدمها لما يُسَمّى اليوم الجهد) وأنّه أكثر حساسية من أفضل مكشاف كهربائي طوره هو أو آخرون* .



الشكل 18-2: بطارية فولتية من بحث فولتا الأصلي.

أثبت فولتا من خلال بحثه أن مجموعة معينة من الفلزات تحدث تأثيرا أكثر من غيرها، وباستعمال القياسات، قام بترتيبها حسب قدرتها على التأثير (هذه المجموعة الكهروكيميائية مازالت تستخدم من قبل الكيميائيين حتى يومنا هذا). كما وجد أيضًا أن الكربون يمكن أن يستخدم بدلًا من أحد هذه الفلزات.

أدرك فولتا مساهمته العظيمة في مجال العلوم، وضع قطعة قماش أو ورقة مشبعة بمحلول ملحي أو حمضي مخفف بين قرصين أحدهما من الخارصين والآخر من الفضة، وشكل بطارية من مثل هذه الأزواج وذلك بوضع أحدهما فوق الآخر كما في (الشكل 18-2). إنّ هذا التراكم للأقراص "أو البطارية يحدث فرق جهد متزايدًا، وبالفعل، عند توصيل نهايتي هذا التراكم مع بعضهما بوساطة شريط فلزي، فإن شرارة كهربائية تنتج. قام فولتا بتصميم وبناء أول بطارية كهربائية، ونشر اكتشافه في عام 1800.

الخلايا الكهربائية والبطاريات

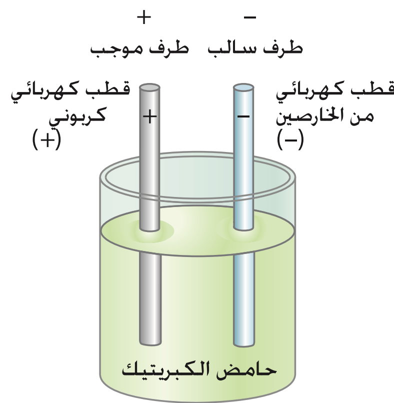
تنتج البطارية الكهرباء بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية. ويتوافر في الوقت الحاضر تشكلية واسعة من الخلايا الكهربائية والبطاريات؛ من بطاريات مصباح الجيب إلى بطارية التخزين التي في السيارة. تحتوي البطاريات البسيطة على لوحين أو قضيبين من فلزين مختلفين (يمكن أن يكون أحدهما من الكربون) تسمى **أقطابا**. تغمس الأقطاب في محلول مثل حامض مخفف. يسمى كهروليت (محلول كهربائي). يسمى مثلُ هذا الجهاز الخليةَ الكهربائية. في حين تسمى مجموعة الخلايا الموصولة مع بعضها **بطارية**، بالرغم من أنّ الخلية الواحدة في الوقت الحاضر تُسَمّى بطاريّة.

أقطاب

*الكشاف الكهربائي الأكثر حساسية الذي طوره فولتا (انظر البند 16-4 والشكل 16-10) تمكن من قياس 40 V لكل زاوية (زاوية انفراج الورقتين). وعلى الرغم من ذلك، فقد كان باستطاعته تقدير فروق الجهد التي تنتج بوساطة فلزين مختلفين متلامسين: عند تلامس الفضة-الخارصين حصل على 0.7 V وهو قريب جداً من القيمة الحالية المعروفة وهي 0.78 V.

إنّ التفاعلات الكيميائية التي تحدث في أغلب الخلايا الكهربائية معقّدة جدًّا. وسنصف هنا كيفيّة عمل إحدى أبسط الخلايا مع التركيز على الجوانب الفيزيائية.

إنّ الخليّة المبينة في (الشكل 18-3) تستعمل حامض كبريتيك مخفّف كمحلول كهربائي (كهروليت). أحد الأقطاب مصنوع من الكربون والآخر من الخارصين. ويُسَمّى الجزء الخارج من المحلول لكلّ قطبٍ طرفا، ويتمّ توصيل الأسلاك والدارات مع هذه الأطراف. ويحاول الحامض تحليل قطب الخارصين. تترك كلّ ذرّةٍ خارصين إلكترونين على القطب، وتدخل إلى المحلول كأيون موجب. وهكذا يكتسب قطب الخارصين شحنة سالبة. وعندما يصبح المحلول الكهربائي (الكهروليت) موجب الشحنة فإن الإلكترونات تنتزع من قطب الكربون. وبالتالي يصبح قطب الكربون موجب الشحنة. ولأنّ الشحنة على القطبين مختلفة، ينشأ فرق جهد (أو فولتية) محدد بين طرفي البطارية. وإذا سمح للشحنة بالتدفق بين الطرفين من خلال سلك (أو مصباح كهربائي) فإنّ كميّةً أكثر من الخارصين تتحلّل. وبعد فترةٍ زمنيّةٍ يستهلك أحد القطبين أو القطب الآخر وتصبح الخلية ميتة.



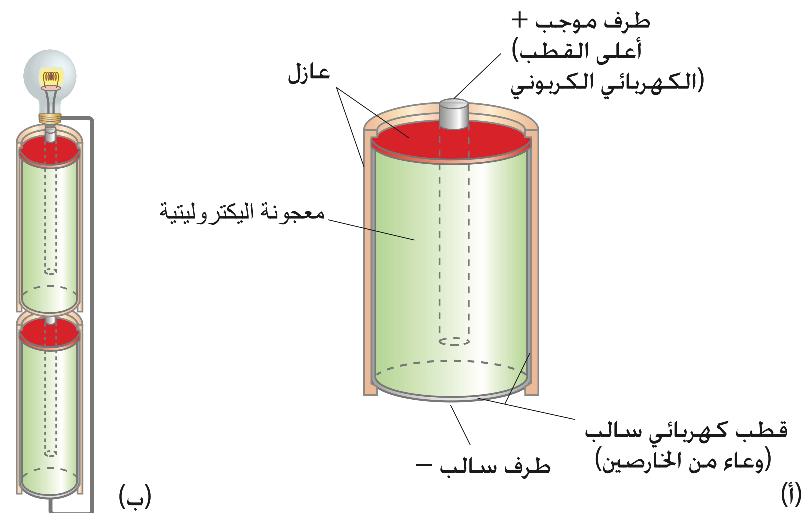
الشكل 18 - 3: خلية كهربائية بسيطة

تنتج البطاريات فرق جهد (فولتية).

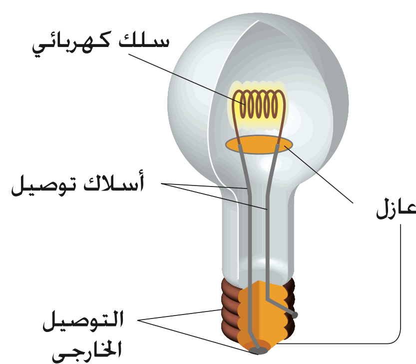
تعتمد الفولتية التي توجد بين طرفي بطارية على المواد التي يصنع منها القطبان، وعلى مقدرتهما على التحلل أو منح الإلكترونات.

وعند توصيل خليتين أو أكثر بحيث يتصل الطرف الموجب لإحداهما مع الطرف السالب للأخرى يقال عندها بأنهما موصولتان على التوالي وتجمع فولتيتهما. لذلك فإن الفولتية بين نهايتي بطاريتي (الفولتية بين طرفي كلٍّ واحدةٍ منهما) مصباح جيب موصولتين على التوالي تساوي 3.0 V. في حين أنّ ست خلايا (فولتية كلّ واحدة منها 2 V) لبطاريّة التخزين في السيارة تُعطي 12 V. يبين (الشكل 18-4 أ) مخطّط خلية جافة أو بطارية مصباح جيب الشائعة التي تستخدم في المذياع المحمول وأجهزة CD الرقمية. ويوضح (الشكل 18-4 ب) خليتين صغيرتين موصولتين على التوالي إلى فتيل مصباح جيب. يتكوّن فتيل مصباح الإنارة من سلك رفيع على شكل ملفٍّ يوضع داخل زجاجة مفرغة من الهواء كما في (الشكل 18-5). وفي الصورة الكبيرة الموجودة في افتتاحية هذا الفصل صفحة 493. يسخن الفتيل ويتوهج عندما تمر الشحنة خلاله.

الشكل 18-4 (أ) مخطط للخلية الجافة المألوفة (مثل خلية D أو AA). كأس أسطوانية من الخارصين مغطاة من الجوانب: الجزء السفلي المستوي هو القطب السالب. (ب) خليتان جافتان موصولتان على التوالي. لاحظ أن الطرف الموجب لإحداهما يتصل مع الطرف السالب للأخرى.

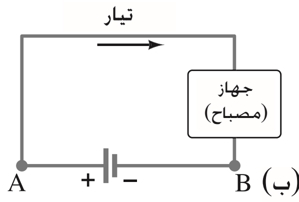


الشكل 18-5 فتيل مصباح الإنارة: يتوهج المصباح عندما يصبح السلك الدقيق لهذا الفتيل ساخناً جدا. يسمى هذا النوعُ المصباحَ المتوهج (مقارنة مع المصباح الفلوري).



الشكل 18-6: (أ) دارة كهربائية بسيطة. (ب) رسم تخطيطي للدارة نفسها، يحتوي على بطارية، وأسلاك توصيل (الخطوط العريضة ذات اللون الرمادي) ومصباح أو جهاز آخر.


(أ)

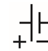


(ب)

2-18 التيار الكهربائي

إن الهدف من البطارية هو إنتاج فرق جهد يجعل الشحنات تتحرك. عندما يتم توصيل مسار موصل مغلق بين طرفي بطارية، فإننا نحصل على دارة كهربائية (الشكل 18 - 6 أ). وعلى مخطط أي دارة كما في (الشكل 18 - 6 ب). نستعمل الرمز

دارة كهربائية

 [رمز البطارية]

رمز بطارية

ليمثل بطارية. إنّ الجهاز الموصول مع البطارية يمكن أن يكون مصباحًا كهربائيًا، أو سخّانًا، أو مذياعًا، أو أي أداة أخرى. عندما تتشكّل مثل هذه الدارة، تتدفق الشحنة في الدارة خلال الأسلاك من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر طالما أنّ المسار الموصل مغلق. يُسَمّى مثل هذا التدفق للشحنة **تيارًا كهربائيًّا**. وبدقة أكثر، يعرف التيار الكهربائي في سلك على أنّه مقدار الشحنة الكليّة التي تمرّ خلال كامل المقطع المستعرض للسلك عند أي نقطة لكل وحدة زمن. وهكذا يعرف التيار I كما يلي:

تيار كهربائي

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \textbf{(1 - 18)}$$

حيث تمثل ΔQ كمية الشحنة التي تمر خلال الموصل في أي موضع خلال الفترة الزمنية Δt.

يقاس التيار الكهربائي بالكولوم لكلّ ثانية؛ وقد أُعطي اسمًا خاصًّا وهو الأمبير (اختصارًا *amp* أو A) نسبة إلى الفيزيائي الفرنسي أندريه أمبير (1775 - 1836). وهكذا فإنّ $1\ A = 1\ C/s$. وغالبًا ما تستعمل وحدات أصغر لقياس التيار، مثل ملي أمبير $(1\ mA = 10^{-3}\ A)$ وميكروأمبير $(1\ \mu A = 10^{-6}\ A)$.

وحدة التيار الكهربائي: الأمبير $(1\ A = 1\ C/s)$

يمكن أن يتدفق التيار في دارة فقط إذا كان هناك مسارٌ موصلٌ مغلق. ليكون لدينا **دارة كاملة**. ولكن إذا كان هناك انفصال في الدارة، مثل سلك مقطوع، عندئذ تسمى **دارة مفتوحة** ولا يتدفق التيار. في أي دارة تحتوي على مسار وحيد فقط يتبعه التيار كما في (الشكل 18-6 ب). فإن شدة التيار في أي لحظة عند نقطة ما (مثل النقطة A) هي شدة التيار نفسها عند أي نقطة أخرى (مثل B). وهذا نتيجة لحفظ الشحنة الكهربائية: الشحنة لا تفنى. البطارية لا تخلق (أو تفني) أي شحنة كلية. كما أن المصباح الكهربائي لا يمتص الشحنة ولا يفنيها.

دارة كهربائية: مغلقة أو مفتوحة

تنويه:
البطارية لا تخلق شحنة، والمصباح الكهربائي لا يفني الشحنة.

المثال 18-1 التيار تدفق للشحنة

يمرُّ تيارٌ ثابت شدته 2.5 A في سلك لمدة 4.0 min (أ) كم كمية الشحنة التي تمرُّ في نقطةٍ ما في الدارة خلال 4.0 min؟ (ب) كم عدد الإلكترونات في هذه الكمية؟

النهج: التيار هو تدفق الشحنة لكلّ وحدةٍ زمن (المعادلة 18-1) لذلك فإنّ كميَّة الشحنة التي تمرُّ في نقطةٍ ما هي حاصل ضرب التيار في الفترة الزمنية. للحصول على عدد الإلكترونات (ب) نقسم على شحنة الإلكترون.

الحل: (أ) بما أنّ التيار 2.5 A أو 2.5 C/s فإننا نحصل على الشحنة الكلية التي تمرُّ في نقطةٍ ما من السلك خلال (240 s =) 4.0 min من المعادلة 18-1:

$$\Delta Q = I\ \Delta t = (2.5\ C/s)(240\ s) = 600\ C$$

(ب) الشحنة التي يحملها إلكترون تساوي $1.60 \times 10^{-19}\ C$. وبالتالي فإن 600 C تحتوي على عددٍ من الإلكترونات يساوي:

$$\frac{600\ C}{1.6 \times 10^{-19}\ C/electron} = 3.8 \times 10^{21}\ electrons.$$

تمرين (أ) إذا مرّ مليون إلكترون من نقطةٍ ما في سلك، فما شدّة التيار بوحدة الأمبير؟

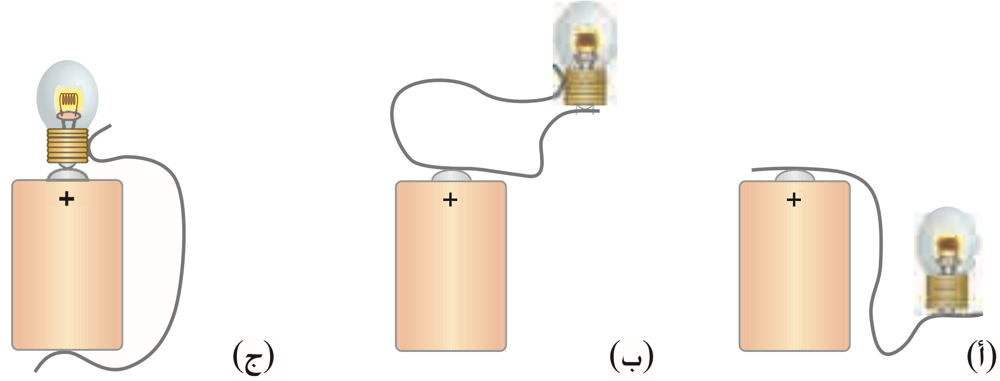
المثال المفاهيمي 2-18 **كيف يتم وصل البطارية؟**

ما الخطأ في كلّ مخطّطٍ من المخطّطات المبينة في (الشكل 18-7) لإضاءة مصباح كهربائي باستعمال بطارية مصباح الجيب وسلك؟

الجواب: (أ) لا يُوجد مسارٌ مغلقٌ تتدفّقُ خلاله الشحنة. قد يبدأ تدفّقٌ بسيط للشحنات باتجاه المصباح. ولكنّها تصل إلى "طريق مسدود" يتوقف عنده تدفّقُ الشحنات في الحال.

(ب) الآن. هناك مسارٌ مغلق يمرُّ خلاله التيار إلى المصباح. ولكن السلك يلامس أحد طرفي البطارية فقط. لذلك لا يوجد فرق جهد في الدارة يجعل الشحنة تتحرّك باستمرار.

(ج) هنا لا يوجد خطأ في التوصيل؛ فهذه دارة كاملة. يمكن أن تتدفق الشحنة من أحد طرفي البطارية خلال السلك والمصباح إلى الطرف الآخر. ويؤدي هذا إلى إضاءة المصباح.



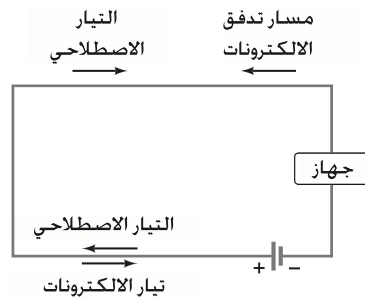
الشكل 18-7: المثال 18-2.

في العديد من الدارات الحقيقية. توصل الأسلاك مع موصل مشترك لضمان الاستمرارية. يُسَمّى هذا الموصل المشترك "**الأرضي**" ويمثل عادة هكذا ⏚ وهو متصل حقيقة بالأرض في بناية أو منزل. وفي السيارة. يُسَمّى أحد طرفي البطارية "الأرضي" ولكنه غير موصول بالأرض ـــ بل إنّه موصول بهيكل السيارة. مثل التوصيل مع كلّ مصباح والأجهزة الأخرى. لذلك فإنّ هيكل السيارة موصول في دارة؛ لضمان مسار مغلق لتدفق الشحنة.

الأرضي، ودارات كاملة.

رأينا في الفصل 16 (البند 16-3) أنّ الموصلات تحتوي على عدد كبير جدًّا من الإلكترونات الحرة. لذا فإنّه عند توصيل سلك موصل بطرفي بطارية فإن الإلكترونات تتدفق في السلك. وعندما يتم توصيل السلك. ينتج فرق جهد بين طرفي البطارية يعمل على إيجاد مجال كهربائي داخل السلك ويكون موازيًا له. تنجذب الإلكترونات الحرة من إحدى نهايتي السلك إلى الطرف الموجب. وفي الوقت نفسه تغادر إلكترونات أخرى الطرف السالب للبطارية وتدخل السلك* عند الجانب الآخر. هناك تدفق مستمر للإلكترونات خلال السلك يبدأ عندما يتم توصيل السلك بطرفي البطارية. وعلى أيّ حال. عندما وضع مصطلحًا الشحنة الموجبة والسالبة قبل قرنين من الزمن. افترض أن الشحنة الموجبة هي التي تتدفق في السلك. وللغايات جميعها تقريبًا. فإنّ تدفق الشحنة الموجبة في اتجاه ما يكافيء تماما تدفق الشحنة السالبة في الاتجاه المعاكس. كما في (الشكل 18-8). في الوقت الحاضر. ما زلنا نستعمل المصطلح التاريخي لتدفق الشحنة الموجبة عندما نناقش اتجاه التيار. لذلك عند الحديث عن اتجاه التيار في دارة. فإنّنا نعني الاتجاه الذي يجب أن تتدفق فيه الشحنة الموجبة. ويشار إلى ذلك أحيانا **بالتيار الاصطلاحي**. وعندما نريد الحديث عن اتجاه تدفق الإلكترونات. فإنّنا نذكر صراحةً أنّه تيار إلكتروني. في السوائل والغازات يمكن لكلا الشحنتين (أيونات) أن تتحرّكا.

الشكل 18-8: تيار اصطلاحي من + إلى − يكافيء تدفق إلكترون سالب من − إلى +.



تنويه:

ميز التيار الاصطلاحي من تدفق الإلكترونات.

* هذا لا يناقض ما تم توضيحه في البند 16-9 في حالة السكون، لا يمكن أن يكون هناك مجال كهربائي داخل موصل وإلّا لتحركت الشحنات. وبالفعل، عندما يكون هناك مجال كهربائي داخل موصل فإنّ الشحنات تتحرك فنحصل على تيار كهربائي.

18-3 قانون أوم: المقاومة والمقاومات

لتوليد تيار كهربائي في دارة. يجب أن يكون هناك فرق في الجهد. إحدى طرق توليد فرق جهد بين طرفي سلك هي في توصيل نهايتيه مع الطرفين المتقابلين لبطارية. لقد كان جورج سيمون أوم أول من أثبت تجريبيًا أنَّ التيار المارّ في سلك فلزي يتناسب مع فرق الجهد V المؤثر بين طرفيه:

$I \propto V$.

فعلى سبيل المثال، إذا وصل سلك إلى بطارية 6-V فإن التيار الذي سيمر في السلك يكون ضعف التيار فيما لو وصل السلك إلى بطارية 3-V. ووجد كذلك أن عكس إشارة الفولتية لا يؤثر في شدة التيار.

تشابه مع تدفق الماء

يمكن مقارنة تدفق الشحنة في سلك مع تدفق الماء في نهر أو في أنبوب بفعل الجاذبية الأرضية. إذا كان النهر أو الأنبوب مستوياً تقريباً، فسيكون معدل التدفق صغيرا. ولكن إذا كانت إحدى النهايتين مرتفعة بطريقة ما عن الأخرى، فإن معدل التدفق — أو التيار — يكون كبيرا. فكلما زاد الفرق في الارتفاع . ينساب التيار بشكل أكبر. رأينا في الفصل 17 أنّ الجهد الكهربائي في حالة الجاذبية الأرضية يناظر الارتفاع لجرف. وهذا يطبق في الحالة الراهنة على الارتفاع الذي يتدفق منه السائل. تماما، كلما زاد الارتفاع زاد تدفق الماء . لذا، فإنّ فرق جهد " أو فولتية" كبير يسبب تيارا كهربائيا كبيرا.

تعتمد شدة التيار في سلك على المقاومة التي يبديها السلك لتدفق الإلكترونات و ليس فقط على الفولتية. تبدي جدران الأنبوب أو ضفتا النهر والصخور التي في المنتصف مقاومةً لتدفق التيار. وهذا يشبه تدفق الإلكترونات التي تقاوم بسبب التصادمات مع ذرّات مادة السلك. وكلّما زادت المقاومة، يقل التيار لفولتية ما V . وبالتالي نعرف المقاومة الكهربائية بحيث يتناسب التيّار عكسيًّا مع المقاومة: أي أن

$$R = \frac{V}{I} \qquad \text{(18-2أ)}$$

حيث R مقاومة السلك أو أيّ جهاز آخر، وV فرق الجهد المؤثر بين طرفي السلك أو الجهاز. أمّا I فتمثل التيار الذي يمر فيه . وغالبا ما تكتب المعادلة 18-2أ كمايلي:

قانون أوم

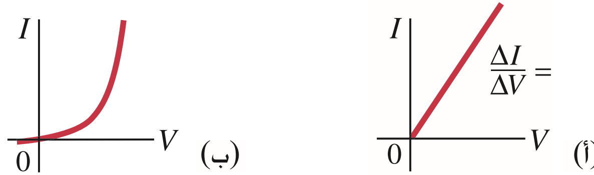
$$V = IR. \qquad \text{(18-2 ب)}$$

كما أشرنا أعلاه، وجد أوم تجريبيا أن مقاومة (R) الموصلات الفلزية ثابته ولا تعتمد على الجهد V، وهذه النتيجة تعرف بـ "**قانون أوم**". وتسمى المعادلة 18-2 ب $V = IR$ أحيانا قانون أوم. ولكن فقط عندما تطبق على مواد أو أجهزة لا تعتمد مقاومتها على الجهد V. ولكن R غير ثابتة للعديد من المواد غير الفلزية، ولا لبعض الأجهزة مثل الديود، وأنبوب التفريغ، والترانزستور وغيرها. وهكذا، فإن قانون أوم ليس قانونًا أساسيًّا، ولكنه يصف نوعًا معينًا من المواد؛ الموصلات الفلزية. تُسَمّى المواد أو الأجهزة التي لا تخضع لقانون أوم $(R =$ ثابت$)$ غير أومية، انظر (الشكل 18-9).

وحدة المقامة الكهربائية: الأوم $(1\,\Omega = 1\,\text{V/A})$

وحدة المقاومة الكهربائية هي **الأوم** وتكتب اختصارًا Ω (حرف لاتيني، أوميغا). أي أن $R = V/I$, $1.0\,\Omega$ يكافيء $1.0\,\text{V/A}$.

الشكل 18-9 رسوم بيانية للتيار مقابل الجهد (أ) موصل فلزي يخضع لقانون أوم. (ب) جهاز غير أومي، في هذه الحالة ديود شبه موصل.



المثال 3-18 مقاومة فتيل مصباح الجيب.

يمرّ تيار كهربائي شدته 300 mA ناتج من بطارية 1.5-V في فتيل صغير لمصباح الجيب. كما في (الشكل 18-10). (أ) ما مقاومة فتيل المصباح؟ (ب) إذا أصبحت البطارية ضعيفة وهبط الجهد إلى 1.2 V فكيف يتغير التيار؟

النهج: يمكن تطبيق قانون أوم على الفتيل. حيث إن الجهد المؤثر هو فولتية البطارية.

الحل: (أ) نحول 300 mA إلى 0.30 A ونستعمل المعادلة 18-2:

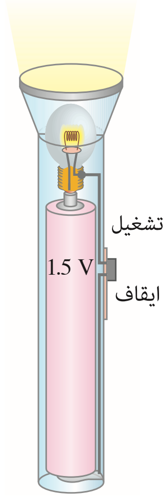
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5\ \text{V}}{0.30\ \text{A}} = 5.0\ \Omega$$

(ب) إذا بقيت المقاومة كما هي، فإن التيار يصبح:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.2\ \text{V}}{5.0\ \Omega} = 0.24\ \text{A} = 24\ \ \text{mA}$$

أي يقل بمقدار 60 mA.

ملحوظة: مع انخفاض التيار في الفرع (ب) تقل درجة حرارة الفتيل ويصبح المصباح أقل سطوعًا. وتعتمد المقاومة أيضًا على درجة الحرارة (البند 18-4) لذلك فإن العملية الحسابية التي قمنا بها تقريبية فقط.



الشكل 18-10: مصباح جيب (المثال 18-3). لاحظ كيف أن الدارة مغلقة على طول الشريط الجانبي.

تمرين ب: ما مقاومة فتيل مصباح جيب إذا مر فيه تيار شدته 0.50A عند توصيله مع 120 V؟



الشكل 18-11: صورة مقاومات، إضافة إلى أجهزة أخرى على لوحة دارة كهربائية.

إنّ الأجهزة الكهربائية جميعها: من السخان إلى فتيل المصباح إلى مضخم المسجل تبدي مقاومة لتدفق التيار. يعد فتيل المصباح الكهربائي (الشكل 18-5) والسخان الكهربائي أنواعا خاصة من الأسلاك تنتج مقاومتها عندما تصبح ساخنة جدا. وبصورة عامة فإن مقاومة أسلاك التوصيل قليلة جدا مقارنة مع مقاومة سلك فتيل المصباح أو مع مقاومة ملف؛ لذلك فإن الأسلاك عادة ما يكون تأثيرها في مقدار التيار أقل ما يمكن. تستعمل **المقاومات** للتحكم في مقدار التيار في العديد من الدارات، وخاصة الأجهزة الإلكترونية

تتراوح المقاومات مابين أقل من أوم إلى ملايين الأومات. (انظر الشكلين 18-11 و 18-12). تقسم الأنواع الرئيسة للمقاومات إلى: مقاومات على شكل "سلك ملفوف" مكوّنة من ملفٍّ سلكٍ رفيع، ومقاومات مركّبةً تركيبًا وهي مصنوعة عادةً من الكربون. وكربون رفيع أو أغشية فلزية.
عندما نرسم مخطط دارة نستعمل الرمز

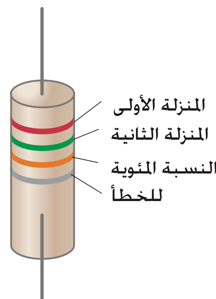
رمز مقاومة

-\/\/\/- [رمز المقاومة]

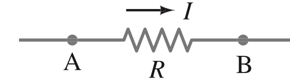
ليشير إلى مقاومة. ترسم الأسلاك التي مقاومتها مهملة ببساطة كخط مستقيم.

الشيفرة اللونية للمقاومات

اللون	العدد	المضاعف	الخطأ
أسود	0	1	
بني	1	10^1	
أحمر	2	10^2	
برتقالي	3	10^3	
أصفر	4	10^4	
أخضر	5	10^5	
أزرق	6	10^6	
بنفسجي	7	10^7	
رمادي	8	10^8	
أبيض	9	10^9	
ذهبي		10^{-1}	5%
فضي		10^{-2}	10%
لا لون			20%



الشكل 18-12: تكتب قيمة المقاومة على خارجها، وقد تعطى كشيفرة لونية كما هو موضح أعلاه وفي الجدول: يمثل اللونين الأول والثاني أول منزلتين في قيمة المقاومة، أما اللون الثالث فيمثل القوة للعدد عشرة التي يجب أن يضرب فيه، في حين يشير اللون الرابع إلى النسبة المئوية للخطأ في التصنيع. فعلى سبيل المثال، المقاومة التي ألوانها الأربعة هي الأحمر، والأخضر، والأصفر و الفضي تكون مساوية: $25 \times 10^4\ \Omega = 250{,}000\ \Omega = 250\ \text{k}\Omega$ زائد أو ناقص 10%.



الشكل 18-13: المثال 18-4

المثال المفاهيمي 18-4 **التيار والجهد**

يمرّ تيار I في المقاومة R كما في (الشكل 18-13). (أ) أيّ النقطتين تكون عندها قيمة الجهد أعلى: A أم B؟ (ب) أي النقطتين يكون عندها شدة التيار أكبر: A أم B؟

الجواب: (أ) تتدفق الشحنة الموجبة دائما من + إلى - : أي من جهد عال إلى جهد أقلّ. فكّر فيما يقابل ذلك في مجال الجاذبية الأرضية، حيث تسقط كتلة ما من نقطة طاقة الوضع عندها مرتفعة إلى نقطة طاقة الوضع عندها أقل. وكذلك الحال بالنسبة إلى تيار موجب I، حيث إن جهد النقطة A أعلى من جهد النقطة B.

(ب) يتطلب حفظ الشحنة أن يكون مقدار الشحنة الذي يتدفق إلى المقاومة عند النقطة A مساوياً لمقدار الشحنة الذي يخرج منها عند النقطة B. لا تستهلك الشحنة أو التيار عند مروره في المقاومة، تماما كما يحدث بالنسبة إلى الجسم الذي يسقط في مجال الجاذبية حيث تتغير طاقة الوضع، ولكن دون كسب كتلة أو فقدها. لذلك فإنّ شدّة التيار عند A هي شدة التيار عند B نفسها.

هبوط الفولتية

يُسَمّى النقص في الجهد الكهربائي، مثلًا من النقطة A إلى النقطة B في المثال 18-4، هبوط الجهد أو هبوط الفولتية.

بعض التوضيحات المساعدة

تنويه: تؤثر الفولتية عبر جهاز، ويمر التيار خلال جهاز.

سنلخص هنا بعض سوء الفهم المحتمل وتوضيحاته بإيجاز. إنّ البطاريات لا تعطي تيارًا ثابتًا، ولكنّها تحاول أنّ تبقي على فرق جهد ثابت أو قريبًا من الثبات. (التفاصيل في الفصل اللاحق). لذا، يجب أن تعدّ البطارية مصدرًا للفولتية.

الفولتية تؤثر عبر سلك أو جهاز. يمرّ التيار الكهربائي **خلال** سلك أو جهاز (موصول مع بطارية). وتعتمد شدّته على مقاومة ذلك الجهاز. والمقاومة خاصية للسلك أو الجهاز. ومن جهة أخرى، تكون الفولتية خارج السلك أو الجهاز، وتؤثّر عبر نهايتيهما. وقد يُسَمّى التيار خلال الجهاز "الاستجابة": يزداد التيار إذا زادت الفولتية أو إذا قلت المقاومة حيث $I = V/R$. التيار ليس كمية متجهة على الرغم من أنّ له اتجاهًا. وفي أي سلك، فإنّ التيار دائمًا يكون موازيًا للسلك بصرف النظر عن كيفية انحنائه، تمامًا مثل الماء في أنبوب. يكون اتجاه التيار الاصطلاحي (موجبا) من الجهد المرتفع (+) إلى الجهد المنخفض (-) .

تنويه: التيار لا يستهلك.

إنّ التيار والشحنة لا يزداد أي منهما أو يقل أو يستهلك عندما يمرّ خلال سلك أو جهاز آخر. وأنّ كمية الشحنة التي تعبر من إحدى النهايتين تخرج من النهاية الأخرى.

4-18 المقاومية

وجد تجريبيا أن المقاومة R لأي سلك تتناسب طرديا مع طوله L وعكسيًّا مع مساحة مقطعه المستعرض A؛ أي أنّ:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \textbf{(3-18)}$$

المقاومية (الوحدات = $\Omega \cdot m$)

حيث ρ ثابت التناسب، وتُسَمّى **المقاومية** وهي تعتمد على المادة المستعملة. القيم المثالية لـ ρ التي تُقاس بوحدات $\Omega \cdot m$ (انظر المعادلة 18-3)، معطاة لمواد مختلفة في العمود المتوسط للجدول 18-1. تعتمد هذه القيم نوعًا ما على كلّ من: النقاوة، والمعالجة الحرارية، ودرجة الحرارة وعوامل أُخرى. لاحظ أنّ للفضة أقل مقاومية، وبالتالي فهي أفضل موصل (على الرغم من أنه ثمين). أما مقاومية النحاس فقريبة من تلك التي للفضة، إلا أنّ النحاس أرخص ثمنًا بكثير، وعليه فإنّ أكثر أسلاك التوصيل مصنوعة من النحاس. ولكنّ الألمنيوم، رغم أنّ مقاومته أكبر من تلك التي للنحاس إلا أنه أقل كثافة، ولذلك يفضل على النحاس في بعض الحالات حيث يستعمل في خطوط الإرسال؛ لأنّ مقاومته للوزن نفسه أقلّ من تلك التي للنحاس.

الجدول 18-1 المقاومية ومعاملات درجة الحرارة (عند 20 °C)

المادة	المقاومية $\rho(\Omega\cdot m)$	المعامل الحراري $\alpha\,(C^\circ)^{-1}$
موصلات		
فضة	1.59×10^{-8}	0.0061
نحاس	1.68×10^{-8}	0.0068
ذهب	2.44×10^{-8}	0.0034
ألمنيوم	2.65×10^{-8}	0.00429
تنجستن	5.6×10^{-8}	0.0045
حديد	9.71×10^{-8}	0.00651
بلاتين	10.6×10^{-8}	0.003927
زئبق	98×10^{-8}	0.0009
نيكروم (سبيكة Cr, Fe, Ni)	100×10^{-8}	0.0004
*أشباه الموصلات**		
كربون (جرافيت)	$(3-60) \times 10^{-5}$	-0.0005
جرمانيوم	$(1-500) \times 10^{-3}$	-0.05
سيليكون	$0.1-60$	-0.07
عوازل		
زجاج	$10^{9}-10^{12}$	
مطاط قاس	$10^{13}-10^{15}$	

* تعتمد قيمها بشدة على وجود الشوائب ولو بمقدار قليل.

المثال 18-5 أسلاك مكبر الصوت

افترض أنّك تريد توصيل نظام صوتي مع مكبر صوت بعيد (الشكل 18-14). (أ) إذا كان طول كلّ سلك 20 m، فما قطر سلك النحاس الذي يجب أن يستعمل حتى تبقى مقاومة كل سلك أقلّ من 0.10 Ω؟ (ب) إذا كان التيار لكلّ مكبّر صوت يساوي 4.0 A، فما فرق الجهد أو هبوط الفولتية بين طرفي كل سلك؟

النهج: نحل المعادلة 18-3 لنحصل على المساحة A التي من خلالها نستطيع حساب نصف قطر السلك باستعمال $A = \pi r^2$. القطر يساوي $2r$. (ب) يمكن استعمال قانون أوم $V = IR$.

الحل: (أ) نحل المعادلة 18-3 بالنسبة للمساحة A ونجد ρ للنحاس من الجدول 18-1:

$$A = \rho\frac{L}{R} = \frac{(1.68\times10^{-8}\,\Omega\cdot m)(20\,m)}{(0.10\,\Omega)} = 3.4\times10^{-6}\,m^2$$

مساحة المقطع المستعرض A لسلك دائري تساوي $A = \pi r^2$. وعليه فإنّ نصف القطر يجب أن يكون على الأقل:

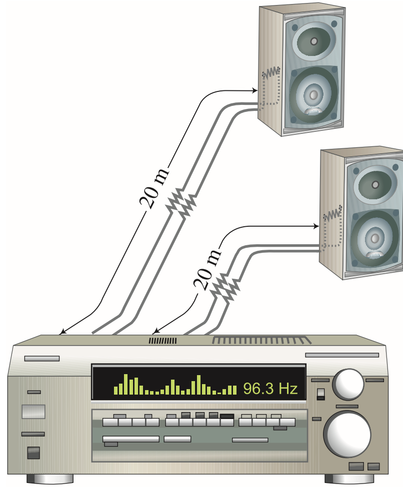
$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 1.04\times10^{-3}\,m = 1.04\,mm$$

القطر يساوي ضعف نصف القطر؛ وعليه يجب أن يكون $2r = 2.1\,mm$.

(ب) من $V = IR$ نجد أنّ هبوط الجهد بين طرفي كلّ سلك يساوي:

$$V = IR = (4.0\,A)(0.10\,\Omega) = 0.40\,V$$

ملحوظة: إنّ هبوط الجهد عبر الأسلاك يقلّل الفولتية التي تصل إلى طرفي مكبّر الصوت من مضخم النظام الصوتي. وهكذا ينخفض مستوى الصوت قليلا.



الشكل 18-14: المثال 18-5

المثال المفاهيمي 18-6 الإستطالة يغير المقاومة

سلك مقاومته R، سحب بانتظام حتى أصبح ضعف طوله الأصلي. ماذا يحدث لمقاومته؟

الجواب: إذا أصبح الطول ضعف الطول الأصلي L، فإنّ مساحة المقطع المستعرض تقل إلى النصف؛ لأنّ الحجم $(V = AL)$ لهذا السلك يبقى كما هو. ومن المعادلة 18-3، نلاحظ أنّ المقاومة تزداد بمقدار أربعة اضعاف $(2/\frac{1}{2} = 4)$.

تمرين ج: قطر أسلاك النحاس في المنازل حوالي 1.5 mm. ما طول سلك مقاومته 1.0-Ω ؟

* اعتماد المقاومة على درجات الحرارة.

تعتمد المقاومية لمادة ما على درجة الحرارة. وبشكل عام فإنّ مقاومية الفلزات تزداد بزيادة درجة الحرارة. وهذا غير مستغرب؛ لأنّه عند درجات الحرارة المرتفعة. فإنّ الذرات تتحرك بسرعة أكثر وتترتب بشكل أقلّ تنظيما. لذا فمن المتوقع أن تتصادم أكثر مع تدفق الإلكترونات. وإذا لم يكن التغير في درجة الحرارة كبيرًا. فإنّ مقاومية الفلزات تزداد تقريبًا بشكل خطي مع درجة الحرارة؛ أي أنّ:

تأثير درجة الحرارة في المقاومية

$$\rho_T = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad \textbf{(4-18)}$$

حيث ρ_0 المقاومية عند درجة حرارة مرجعية T_0 (مثل 0°C او 20°C)، ρ_T المقاومية عند درجة الحرارة T، و α هو **المعامل الحراري للمقاومية**. قيم α معطاة في الجدول 18-1. لاحظ أنّ المعامل الحراري لأشباه الموصلات يمكن أن يكون سالبًا. لماذا؟ على ما يبدو أنّه عند درجات الحرارة المرتفعة فإنّ بعض الإلكترونات التي تكون في الوضع الطبيعي غير حرّةٍ تصبح في أشباه موصّلات حرّة. ويمكن أن تساهم في التيار. لذلك فإنّ مقاومة أشباه الموصّلات يمكن أن تقلّ مع زيادة درجة الحرارة. بالرغم من أنّ هذه الحالة لا تحدث على الدوام.

تطبيق الفيزياء
مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة

المثال 18-7 مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة.

يمكن توظيف اختلاف المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة لعمل قياسات دقيقة لدرجة الحرارة. إنّ البلاتين شائع الاستعمال لأنّه خال نسبيًّا من تأثيرات التآكل. كما أنّ درجة انصهاره عالية. افترض أنّه عند 20°C تكون مقاومة مقياس درجة الحرارة ذي المقاومة البلاتينية 164.2 Ω. وعندما يوضع في محلول معيّن. فإنّ مقاومته ترتفع إلى 187.4 Ω. ما درجة حرارة هذا المحلول؟

النهج: بما أنّ المقاومة R تتناسب طرديًّا مع المقاومية ρ . لذا يمكن دمج المعادلتين 18-3 و 18-4 لإيجاد R بدلالة درجة الحرارة T. ومن ثم حل تلك المعادلة لإيجاد T.

الحل: نضرب المعادلة 18-4 في (L/A) لنحصل على (انظر أيضًا إلى المعادلة 18-3).

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

هنا $R_0 = \rho_0 L/A$ هي مقاومة السلك عند درجة الحرارة $T_0 = 20.0°C$. نحل هذه المعادلة بالنسبة إلى T لنجد أن (انظر إلى الجدول 18-1 للحصول على α)

$$T = T_0 + \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = 20.0°C + \frac{187.4\,\Omega - 164.2\,\Omega}{(3.927 \times 10^{-3}(C°)^{-1})(164.2\,\Omega)} = 56.0°C$$

ملحوظة: إحدى فوائد أجهزة قياس درجة الحرارة ذوات المقاومات أنّه يمكن استعمالها عند درجات حرارة عالية جدًّا أو منخفضة. حيث تكون أجهزة قياس درجة الحرارة السائلة والغازية عديمة الفائدة.

ملحوظة: يكون استعمال **المقاومة الحرارية** في بعض التطبيقات ملائماً أكثر (الشكل 18-15). تتكون هذه المقاومة من أكسيد فلزي أو شبه موصل تتغير مقاومته مع درجة الحرارة بشكل متكرر. يمكن أن تصنع المقاومات الحرارية بحيث تكون صغيرة جدًّا. ولكن استجابتها سريعة جدًّا للتغيرات في درجة الحرارة.



الشكل 18-15: يبين مقاومة حرارية بجانب مسطرة مدرجة بالمليمترات لتدريجه.

تعتمد قيم α نفسها على درجة الحرارة. لذلك فمن الضروري اختيار مجال درجة الحرارة الذي تكون فيه كل قيمة من قيم α صحيحة (مثلاً في كتيب البيانات الفيزيائية). إذا كان مجال درجة الحرارة واسعاً. فإن المعادلة 18-4 غير كافية. لذا فإن الحدود التي تتناسب طرديًّا مع مربع أو مكعب درجة الحرارة تكون ضرورية. ولكن هذه الحدود صغيرة جدا. باستثناء عندما يكون $T - T_0$ كبيراً.

18-5 القدرة الكهربائية

تُعدّ الطاقة الكهربائيه مفيدة لنا؛ والسبب في هذا أنّه يمكن تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة بسهولة؛ فالمحركات تحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية (سنناقش ذلك في الفصل 20).
وفي أجهزة أخرى كالسخان الكهربائي. والفرن الكهربائي. وجهاز التحميص. ومجفف الشعر. فإنّ الطاقة الكهربائية تحوّل إلى طاقة حرارية في سلك مقاومة يُسَمّى عنصر التسخين.

وفي المصباح الكهربائي المألوف، يصبح فتيله (الشكل 18-5 وصورة افتتاحية الفصل) ساخنًا جدًّا ثمّ يتوهج. تتحول أجزاء قليلة بالمئة من الطاقة إلى ضوء مرئي، أمّا الجزء الباقي (أكثر من 90%) فيتحول إلى طاقة حرارية. إنّ فتيل المصباح الكهربائي وعناصر التسخين (الشكل 18-16) في أجهزة الكهرباء المنزلية لها مقاومات تتراوح قيمتها بين عدد قليل من الأومات إلى عدّة مئات منها.

وفي مثل هذه الأجهزة، تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية أو ضوء وتحدث تصادمات عديدة بين الإلكترونات المتحركة وذرات السلك. وفي كل تصادم، ينتقل جزء من الطاقة الحركية للإلكترون إلى الذرة التي يتصادم معها، ويكون نتيجة ذلك ازدياد الطاقة الحركية لذرات السلك، فتزداد درجة حرارة السلك تبعا لهذا. إن الزيادة في الطاقة الحرارية يمكن أن تنتقل كحرارة بوساطة التوصيل والحمل إلى الهواء في السخان الكهربائي أو وعاء الطهي، وبوساطة الإشعاع إلى الخبز في جهاز التحميص، أو أنها تشع ضوءا.

ولإيجاد القدرة المحولة بوساطة جهاز كهربائي، تذكر أن الطاقة المتحولة عندما تتحرك شحنة Q خلال فرق جهد V تساوي QV (المعادلة17-3). وبالتالي، فإن القدرة P، وهي معدل الطاقة المتحولة تساوي:

$$P = \frac{\text{الطاقة المتحولة}}{\text{الزمن}} = \frac{QV}{t}$$

الشحنة التي تتدفق لكل ثانية Q/t تساوي التيار I. لذا يكون لدينا:

$$P = IV. \qquad (5\text{-}18)$$

القدرة الكهربائية (عام)

تعطي هذه العلاقة العامة القدرة المتحولة بوساطة أيّ جهاز، حيث I التيار الذي يمرّ في الجهاز، أما V ففرق الجهد بين طرفيه. كما تعطي هذه العلاقة القدرة التي يزودها مصدر ما مثل البطارية. إن وحدة القدرة الكهربائية في النظام الدولي SI هي **واط** (1 W = 1 J/s)

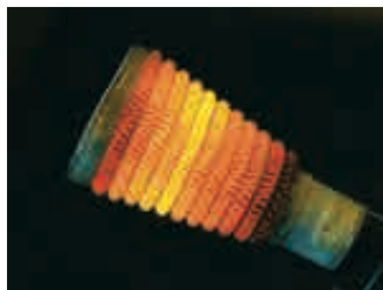
ويمكن كتابة معدل الطاقة المتحولة في المقاومة R بطريقتين: ابدأ من العلاقة العامة $P = IV$، وعوض فيها $V = IR$.

$$P = IV = I(IR) = I^2R \qquad (\text{6 - 18 أ})$$

$$P = IV = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R} \qquad (\text{6 - 18 ب})$$

القدرة الكهربائية (في المقاومة R)

تطبق المعادلتان 18-6 أ و ب فقط على المقاومات، في حين تطبق المعادلة 18-5 ، $P = IV$ على أي جهاز بما فيها المقاوم.



الشكل 18-16: يتوهج ملف عنصر التسخين لسخان كهربائي بسبب تحول الطاقة بفعل التيار الكهربائي.

مثال 18-8 المصابيح الأمامية للسيارة

احسب مقاومة مصباح الضوء الأمامي لسيارة، إذا علمت أن قدرته 40-W، وأنه مصمم ليتحمل فرقاً في الجهد مقداره 12 V (الشكل 18-17).

النهج: المعطيات هي قدرة المصباح وفرق الجهد بين طرفيه، لذا نحل المعادلة 18-6 ب لإيجاد R.

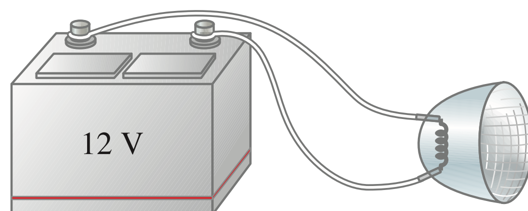
الحل: المعطيات $V = 12$ V، $P = 40$ W . وبحل المعادلة 18-6 ب بالنسبة إلى R نحصل على:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(12\text{ V})^2}{(40\text{ W})} = 3.6\,\Omega$$

ملحوظة: هذه هي المقاومة عندما يسخن المصباح ويتوهج عند قدرة 40 W. عندما يكون المصباح باردا، تكون مقاومته قليلةً جدًّا، كما في المعادلة 18-4. وبما أن شدة التيار تزداد بانخفاض قيمة المقاومة، فإنّ المصباح يحترق عند تشغيله.

تطبيق الفيزياء

لماذا يحترق المصباح الكهربائي عند بداية تشغيله؟



الشكل 18-17: المثال 18-8

إنّ الطاقة هي التي تدفع ثمنها على فاتورة الكهرباء وليست القدرة. وبما أنّ القدرة هي معدّل الطاقة المتحولة، فإنّ الطاقة الكليّة التي يستخدمها أيّ جهاز تساوي القدرة المستهلكة مضروبة في الزمن الذي يعمل خلاله الجهاز. وإذا كانت القدرة بالواط والزمن بالثانية، فإن الطاقة تقاس بوحدة الجول: لأنّ $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. تحدد شركات الكهرباء الطاقة عادةً بوحدة قياسٍ كبيرةٍ وهي **كيلو واط – ساعة** (kWh)، حيث:

$$\text{kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.60 \times 10^6 \text{ J}$$

تنويه:

يدفع ثمن الطاقة التي تساوي القدرة × الزمن، وليس ثمن القدرة.

كيلو واط – ساعة (وحدة الطاقة التي تستعملها شركات الطاقة).

المثال 9-18 السخان الكهربائي

يسحب سخّان كهربائي تياراً شدته 15.0 A من مصدر جهد 120-V. ما القدرة المطلوبة لهذا السخّان؟ وما التكلفة الشهرية (30 يوم) لتشغيله 3.0 h في اليوم إذا علم أنّ شركة الكهرباء تتقاضى 9.2 سنتات لكلّ kWh؟

النهج: معلوم لدينا التيار والفولتية. لذا نستعمل المعادلة 5-18 لإيجاد القدرة. ثم نضرب القدرة (بوحدة kW) في الزمن الذي يستعمل خلاله السخان لنحصل على الطاقة المتحولة في شهر. ثمّ نضرب في تكلفة وحدة الطاقة $0.092 لكل kWh لنحصل على التكلفة الشهريّة.

الحل: القدرة تساوي

$$P = IV = (15.0 \text{ A})(120 \text{ V}) = 1800 \text{ W}$$

أو 1.80 kW. الزمن (بالساعات) الذي يستخدم خلاله السخان في الشهر يساوي $(3.0 \text{ h/d})(30 \text{ d}) = 90 \text{ h}$، وهذا الزمن بتكلفة 9.2¢/kWh يساوي ما مقداره شهرياً $(1.80 \text{ kW})(90 \text{ h})(\$0.092/\text{kWh}) = \$15$

ملحوظة: التيار الكهربائي المنزلي هو في الحقيقة متردد (ac). ولكن هذا الحلّ ما زال صالحًا على فرض أنّ القيم المعطاة لكلٍّ من V و I هي المتوسط المناسب لهما (rms) كما سيتم مناقشته في البند 7-18.

تطبيق الفيزياء

البرق

المثال 10-18 تقدير صاعقة البرق

البرق مثال مثير للتيار الكهربائي في ظاهرة طبيعية (الشكل 18-18). هناك تنوّعٌ كبيرٌ في صواعق البرق. ولكن الظاهرة العادية يمكن أن تنقل طاقة مقدارها 10^9 J عبر فرق جهد قد يصل إلى 5×10^7 V خلال فترة زمنية تقدر بحوالي 0.2 s. استعمل هذه المعلومات لتقدير: (أ) الكمية الكلية للشحنة التي تنتقل بين غيمة والأرض. (ب) التيار في صاعقة البرق. (ج) متوسط القدرة التي تزود خلال 0.2 s.

النهج: نقدر كمية الشحنة Q استنادا إلى أن التغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي فرق الجهد V_{ba} ضرب الشحنة Q (المعادلة 3-17). نساوي ΔPE مع الطاقة المتحولة، $\Delta \text{PE} \approx 10^9$ J. ثم نجد التيار I الذي يساوي Q/t (معادلة 1-18) والقدرة هي الطاقة/ الزمن.

الحل: (أ) من المعادلة 3-17، الطاقة المتحولة هي $\Delta \text{PE} = QV_{ba}$. نحل لإيجاد Q:

$$Q = \frac{\Delta \text{PE}}{V_{ba}} \approx \frac{10^9 \text{ J}}{5 \times 10^7 \text{ V}} = 20 \text{ coulombs}$$

(ب) التيار خلال الفترة الزمنية 0.2 s يساوي حوالي:

$$I = \frac{Q}{t} \approx \frac{20 \text{ C}}{0.2 \text{ s}} = 100 \text{ A}$$

(ج) متوسط القدرة التي تزود خلال 0.2 s يساوي:

$$P = \frac{\text{الطاقة}}{\text{الزمن}} = \frac{10^9 \text{ J}}{0.2 \text{ s}} = 5 \times 10^9 \text{ W} = 5 \text{ GW}.$$

ويمكن أيضًا استعمال المعادلة 5-18:

$$P = IV = (100 \text{ A})(5 \times 10^7 \text{ V}) = 5 \text{ GW}$$

ملحوظة: بما أنّ أكثر صواعق البرق تتكون من عدة مراحل، فمن المحتمل أنّ أجزاءً فرديّةً منها تحمل تيارات أكثر بكثير من 100 A الذي حسبناه في هذا المثال.



الشكل 18-18: المثال 10-18 صاعقة البرق.

تمرين د: بما أنَّ $1\ kWh = 3.6 \times 10^6\ J$، ما الكتلة التي يجب أن ترفع باتجاه معاكس للجاذبية لمسافة متر لعمل كمية مكافئة من الشغل.

6-18 القدرة في الدارات الكهربائية المنزلية

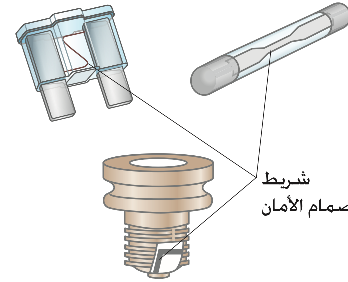
تطبيق الفيزياء

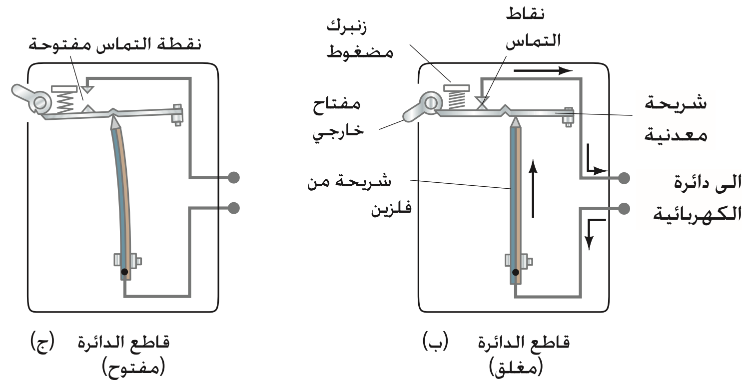
الأمان – أسلاك الدارات المنزلية تسخن.

إنّ الأسلاك الكهربائية التي تحمل الكهرباء إلى مصابيح الإنارة والأجهزة الكهربائة المنزلية الأخرى لها مقاومة معينة. على الرغم من أنها صغيرة عادة. ومع ذلك. إذا كان التيار كبيراً كفاية. فإنّ الأسلاك سوف تسخن وتنتج طاقة حرارية بمعدل يساوي I^2R. حيث R هي مقاومة السلك. ولكن الخطر المحتمل هو أنّ الأسلاك التي تحمل التيار في جدار بناية قد تصبح ساخنة جدًّا بحيث تكون سببًا في بداية حريق. إنّ مقاومة الأسلاك السميكة أقلّ (انظر المعادلة 18-3) ولهذا فإنّها قادرةً على حمل تيار أكبر دون أن تسخن كثيرًا. وعندما يحمل سلك تيارًا أكبر من حدّ الأمان، يقال بأنّه "حمل زائد". ولتجنّب التحميل الزائد: يركب في الدارات الكهربائية صمامات أمان أو قواطع الدارة. وهي في الأساس مفاتيح كهربائية (الشكل 18-19) تفتح الدارة عندما يتجاوز التيار قيمة محددة. فعلى سبيل المثال. يفتح صمامُ الأمان أو قاطعُ الدارة 20-A الدارةَ عندما تزيد قيمة التيار المار فيه على 20 A. إذا كررت دارة ما حرق صمام الأمان أو فتح قاطع الدارة، فإنّ هناك احتمالين: ربّما يكون هناك أجهزة كثيرة تسحب تيارًا من تلك الدارة أو أنّ هناك عيبًا ما في مكان ما مثل عطل تماس. وعطل التماس في الدارة يعني أن هناك سلكين متلامسين. وهو ما لايجب أن يحدث (ربما لأن الطبقة العازلة أصبحت تالفة) لأنه يختزل المسار الذي يتبعه التيار. وهكذا تصبح مقاومة الدارة صغيرة جدا. لذا يكون التيار كبيرًا جدًّا. ويجب أن يتم إصلاح عطل التماس في الدارات سريعًا.

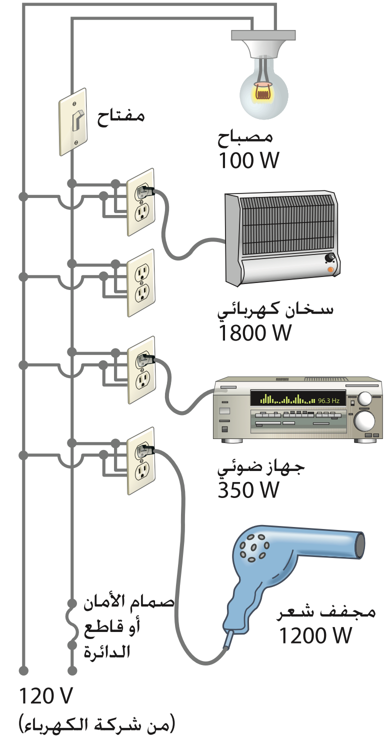
صمامات أمان، قواطع دارة، عطل التماس.

الشكل 18-19: (أ) صمامات الأمان. عندما تتجاوز شدة التيار قيمة معينة، تنصهر الشريحة الفلزية وتفتح الدارة. لذلك يجب استبدال صمام الأمان. (ب) أحد أنواع قواطع الدارة. يمر التيار الكهربائي خلال شريحة من فلزين. عندما تتجاوز شدة التيار مستوى الأمان، فإن تسخين الشريحة المكونة من فلزين يجعل الشريحة تنحني بعيدا إلى اليسار بحيث إن الثلم الذي في الشريحة الفلزية حاملة الزنبرك يسقط فوق نهاية الشريحة المكونة من فلزين. (ج) ثم تفتح الدارة عند نقاط التماس (النقطة التي تلامس الشريحة الفلزية) ويقلب المفتاح الخارجي أيضا. وحالما تبرد الشريحة المكونة من فلزين، يمكن إعادة ضبطها باستعمال المفتاح الخارجي. نوع مغناطيسي لقواطع الدارة نوقش في الفصلين 20 و 21.





تُصَمَّمُ الداراتُ الكهربائية المنزلية بحيث توصل الأجهزة المختلفة للحصول على الفولتية المعيارية (عادة 120 V في الولايات المتحدة) من شركة الكهرباء (الشكل 20-18). تُسَمّى الدارات مع الأجهزة المرتبة في (الشكل 20-18) دارات التوازي، كما ستناقش في الفصل اللاحق. عندما يحترق صمام الأمان أو يفتح قاطع دارة، فمن الضروري اختبار التيار الكلي الذي كان يسحب من الدارة، ويمثل مجموع التيارات في كل جهاز.



الشكل 20-18: توصيل الأجهزة الكهربائية المنزلية.

مثال 11-18 **هل يحترق صمام الأمان؟**

احسب التيار الكلي الذي تسحبه الأجهزة التي في (الشكل 20-18) جميعها.

النهج: كل جهاز له الفولتية 120-V نفسها. التيار الذي يسحبه كل جهاز من المصدر يمكن إيجاده من $I = P/V$ (المعادلة 5-18).

الحل: الدارة التي في (الشكل 20-18) تسحب التيارات التالية:

يسحب المصباح الكهربائي $I = P/V = 100\ \text{W}/120\ \text{V} = 0.8\ \text{A}$، أمّا السخان الكهربائي فيسحب $1800\ \text{W}/120\ \text{V} = 15.0\ \text{A}$.

في حين أن أقصى ما يسحبه المسجل هو $350\ \text{W}/120\ \text{V} = 2.9\ \text{A}$. وأخيرا، فإن مجفف الشعر يسحب $1200\ \text{W}/120\ \text{V} = 10.0\ \text{A}$. وأن التيار الكلي الذي تسحبه هذه الأجهزة يساوي:

$$0.8\ \text{A} + 15.0\ \text{A} + 2.9\ \text{A} + 10.0\ \text{A} = 28.7\ \text{A}$$

إذا استعملت في الوقت نفسه.

ملحوظة: يسحب السخان الكهربائي تيارا أكثر مما يسحبه 18 مصباحا كهربائيًّا قدرة كلٍّ منها 100-W. ولهذا يجب أن يكون السخان الكهربائي متصلاً مع دارة خاصة به كي يكون آمنا.

إذا صممت الدارة التي في (الشكل 20-18) لصمام أمان يتحمل 20-A، فإنه يحترق، وهذا مانأمله لمنع أسلاك التحميل الزائد من أن تصبح ساخنة جدًّا وتشعل حريقًا. لذا يجب أن يفصل بعض هذه الأجهزة كهربائيًّا من هذه الدارة حتى يكون التيار الذي يسحب أقل من 20 A (غالبا ما يكون في المنازل والشقق العديد من الدارات). إذا صُمّمت الدارة من أسلاك سميكة وصمام أمان يتحمل 30-A، فإنّ صمام الأمان يجب ألا يحترق، ولكن إذا احترق فإنّ المشكلة تكون بسبب عطل تماس. (المكان المرجح الذي يحصل فيه عطل التماس يكون في سلك أحد الأجهزة) يختار صمام أمان حجمه مناسب حسب السلك الذي يستعمل لتزويد التيار، وصمام الأمان المناسب الذي يتحمل تيارًا ما يجب ألا يستبدل أبدًا بآخر يتحمل تيارًا أعلى. عندما يحترق صمام الأمان أو يفتح قاطع دارة، فإنّه يعمل كمفتاح يجعل الدارة مفتوحة. إنّ المقصود بالدارة المفتوحة هو أن المسار الموصل المغلق لم يعد موجودًا، لذلك لا يمكن أن يتدفق التيار، كما لو أن $R = \infty$.

تطبيق الفيزياء
صمامات الأمان المناسبة والتماس الكهربائي.

تطبيق الفيزياء
تمديد الأسلاك والخطر المحتمل.

تمرين هـ: قدرة مدفأتك الكهربائية 1800-W ولكنّها بعيدة عن مكتبك بحيث لا تستطيع تدفئة قدميك. ولأنّ سلك المدفأة قصير، أوصلتها مع سلك يتحمل 11 A. لم يعدّ هذا الإجراء خطيرًا؟

7-18 التيار المتردد

عند توصيل بطارية بدارة، يتحرك التيار مستمرًا في اتجاه واحد. وهذا ما يُسَمّى **التيار المستمر** أو dc.

إنّ المولدات الكهربائية في محطّات الطاقة الكهربائية تولد **تيارًا مترددًا** أو ac. (أحيانًا تستعمل الحروف الكبيرة DC أو AC). يعكس التيار المتردّد اتّجاهه مرّات كثيرة في كلّ ثانية، وهو جيبي عمومًا كما في الشكل21-18. تتحرك الإلكترونات بداية في السلك في اتّجاه واحد، ومن ثم في الاتّجاه الآخر. التيار الذي تزود به المنازل والمحال التجارية من شركات الكهرباء هو ac في أنحاء العالم كافة. وسوف نناقش دارات التيار المتردد بالتفصيل في الفصل 21 ونحللها. ولكن بما أنّ دارات التيار المتردّد شائعة كثيرًا في الحياة الواقعية، فسنناقش بعض خصائصها الأساسية هنا.

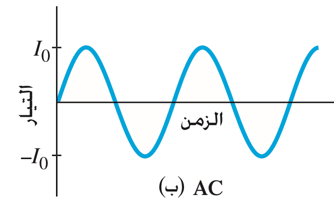
إنّ الفولتية التي تنتجها مولدات ac الكهربائية تكون جيبية، كما سنرى لاحقًا. وبالتالي، فإنّ التيار الناتج منها يكون جيبيًّا أيضًا

(الشكل 21-18 ب). ويمكن كتابة الفولتية بدلالة الزمن كما يلي:

$$V = V_0 \sin 2\pi f t = V_0 \sin \omega t$$

يتذبذب **الجهد** V بين $+V_0$ و $-V_0$. ويعرف V_0 بـ " **فولتية الذروة**". أمّا التردد f فهو عدد الذبذبات الكاملة التي تعمل في الثانية الواحدة. و $\omega = 2\pi f$. وفي أغلب المناطق في الولايات المتحدة وكندا فإن f تساوي 60 Hz.





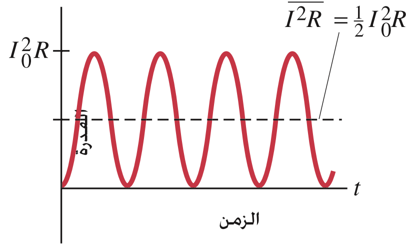
الشكل 21-18: (أ) تيار مستمر. (ب) تيار متردد

(تعني الوحدة هيرتز "*hertz*" كما رأينا في الفصل 11. عدد الدورات في الثانية). وفي دول كثيرة يستعمل التردد 50 Hz. تستعمل المعادلة 18-2. $V = IR$ في حالة التيار المتردد أيضا: فإذا كان الجهد عبر مقاومة R، فإن التيار I الذي يمر خلال المقاومة يساوي

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t \qquad \textbf{(7-18)}$$

تُسَمّى الكمية $I_0 = V_0/R$ تيار الذروة. ويُعدّ التيار موجبا إذا تدفق في اتجاه واحد. في حين يُعدّ سالبًا إذا تدفق في الاتجاه المعاكس. يتضح من (الشكل 18-21 ب) أن التيار المتردد كثيرًا ما يكون موجبًا كما يكون سالبا. لذلك فإن متوسط التيار يكون صفراً. ولكن لا يعني ذلك أنه لا يحتاج إلى قدرة. أو أنه لا يولد حرارة في المقاومة. وتتحرك الإلكترونات ذهابا وإيابا لإنتاج حرارة. وبالفعل. فإن القدرة المتحولة في مقاومة R عند أي لحظة تساوي

$$P = I^2R = I_0^2 R \sin^2 \omega t$$



الشكل 18-22: القدرة المتحولة في مقاومة في دارة ac.

وبما أن التيار تربيعي. فإننا نلاحظ أن القدرة موجبة دائما . كما رسمت بيانيًا في (الشكل 18-22). الكمية $\sin^2 \omega t$ تتراوح بين 1 و 0: وليس من الصعب إثبات أن متوسط قيمتها يساوي $\frac{1}{2}$. كما هو مشار إليه في (الشكل 18-22). لذلك فإنّ متوسط القدرة المتحولة. $\overline{P}$ يساوي:

$$\overline{P} = \tfrac{1}{2} I_0^2 R$$

وبما أنّه يمكن أيضًا كتابة القدرة هكذا

فإنّ متوسط القدرة يكتب كما يلي أيضا:

$$\overline{P} = \frac{1}{2}\frac{V_0^2}{R}$$

وعليه، فإنّ المتوسط أو متوسط القيمة لمربع التيار أو الجهد هو المهم في حساب متوسط القدرة $\overline{V^2} = \frac{1}{2}V_0^2$ و $\overline{I^2} = \frac{1}{2}I_0^2$. والجذر التربيعي لكلٍّ منها يُسَمّى جذر متوسط مربع القيمة للتيار والفولتية. ويكتب اختصارًا **rms**، وتُعطى كما يلي:-

جذر متوسط مربع التيار.

$$I_{rms} = \sqrt{\overline{I^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0.707 I_0 \qquad \textbf{(18-8أ)}$$

جذر متوسط مربع الفولتية

$$V_{rms} = \sqrt{\overline{V^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 0.707 V_0 \qquad \textbf{(18-8ب)}$$

تُسَمّى قيم جذر متوسط مربع التيار والفولتية أحيانًا بالقيم الفاعلة. وهي مفيدة لأنّه يمكن تعويضها مباشرة في الصيغ الرياضية للقدرة (المعادلتان 18-5 و 18-6) للحصول على متوسط القدرة:

$$\overline{P} = I_{rms} V_{rms} \qquad \textbf{(18-9 أ)}$$

$$\overline{P} = \tfrac{1}{2} I_0^2 R = I_{rms}^2 R \qquad \textbf{(18-9 ب)}$$

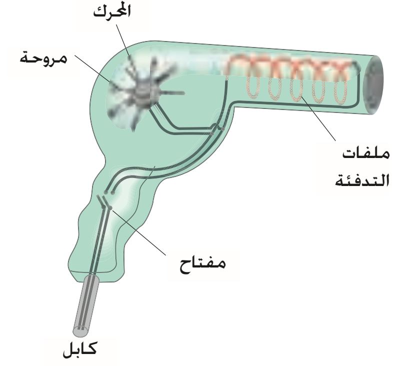
$$\overline{P} = \frac{1}{2}\frac{V_0^2}{R} = \frac{V_{rms}^2}{R} \qquad \textbf{(18-9 ج)}$$

لذلك. فإنّ التيار المباشر الذي تكون فيه قيمتا التيار والفولتية مساويتان لقيمتي جذر متوسط مربع كلٍّ من التيار والفولتية لتيار متردد سوف ينتج القدرة نفسها. إنّ قيمة جذر متوسط مربع التيار هي التي تحدد أو تقاس. فعلى سبيل المثال. في الولايات المتحدة وكندا فولتية الخط العيارية* تساوي 120-V *ac*. إن 120 V هي قيمة V_{rms}؛ أي أن فولتية الذروة V_0 هي:

$$V_0 = \sqrt{2}\, V_{rms} = 170 \text{ V}$$

ولكن في أغلب دول العالم (أوروبا ، واستراليا ، وآسيا) تكون قيمة جذر متوسط مربع الفولتية 240 V. وعليه. فإن فولتية الذروة تساوي 340 V.

* قد تتفاوت فولتية الخط اعتماداً على الحمل الكلي: على أي حال. يبقى التردد 60 Hz أو 50 Hz ثابتًا تمامًا.



الشكل 23-18: مجفف شعر. أغلب التيار يذهب خلال ملفات التسخين، مقاومة نقية، وجزء صغير يذهب إلى المحرك لتشغيل المروحة (المثال 12-18).

المثال 12-18 مجفف الشعر

(أ) احسب مقاومة وتيار الذروة في مجفف شعر قدرته 1000-W (الشكل 23-18) وصل مع خط جهد مقداره 120-V. (ب) ماذا يحصل إذا وصل مع خط جهد 240-V في بريطانيا؟

النهج: معلوم لدينا $\overline{P}$ و $V_{\rm rms}$. لذلك فإن $I_{\rm rms} = \overline{P}/V_{\rm rms}$ (المعادلة 18-9أ أو 18-5) و $I_0 = \sqrt{2}\, I_{\rm rms}$. ثم نجد المقاومة من $V = IR$.

الحل: (أ) نحل المعادلة 18-9 أ بالنسبة إلى I_{rms}:

$$I_{\rm rms} = \frac{\overline{P}}{V_{\rm rms}} = \frac{1000\ \rm W}{120\ \rm V} = 8.33\ \rm A$$

ثم

$$I_0 = \sqrt{2}\, I_{\rm rms} = 11.8\ \rm A$$

المقاومة تساوي

$$R = \frac{V_{\rm rms}}{I_{\rm rms}} = \frac{120\ \rm V}{8.33\ \rm A} = 14.4\ \Omega$$

يمكن حساب المقاومة أيضًا باستعمال قيم الذروة:

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{170\ \rm V}{11.8\ \rm A} = 14.4\ \Omega$$

(ب) عند توصيله مع خط جهد 240-V، يتدفق تيار أكثر، وتتغير المقاومة مع زيادة درجة الحرارة (البند 18-4). ولكن دعنا نقدّر القدرة المتحولة على أساس قيمة المقاومة 14.4-Ω نفسها. يكون متوسط القدرة

$$\overline{P} = \frac{V^2_{\rm rms}}{R} = \frac{(240\ \rm V)^2}{(14.4\ \Omega)} = 4000\ \rm W$$

وهذا يمثل أربعة أضعاف قدرة مجفف الشعر. ومن دون شك، فإن هذا يؤدي إلى انصهار عنصر التسخين أو سلك ملفات المحرك.

المثال 13-18 قدرة النظام الصوتي

إنَّ كلَّ قناة في مستقبل النظام الصوتي قادرة على تزويد قدرة 100 W لتغذية مكبر صوت مقاومته 8-Ω (الشكل 18-14). احسب قيمتي جذر متوسط مربع الفولتية والتيار اللذين يغذيان مكبر الصوت: (أ) عند القيمة القصوى للقدرة 100 W. (ب) عند قدرة 1.0 W عندما تنخفض حدة الصوت.

النهج: نفترض أنّه يمكن اعتبار مكبر الصوت كمقاومة بسيطة (ليس صحيحًا تمامًا، انظر إلى الفصل 21) قيمتها $R = 8.0\ \Omega$.

معلوم لدينا القدرة P، لذلك يمكن إيجاد $I_{\rm rms}$ و $V_{\rm rms}$ باستعمال معادلات القدرة 18-9.

الحل: (أ) نحل المعادلة 18-9 ج بالنسبة إلى $V_{\rm rms}$ ونضع $\overline{P} = 100\ \rm W$ (عند القيمة القصوى):

$$V_{\rm rms} = \sqrt{\overline{P}R} = \sqrt{(100\ \rm W)(8.0\ \Omega)} = 28\ \rm V$$

ثم نحل المعادلة 18-9 ب بالنسبة إلى $I_{\rm rms}$ لنحصل على

$$I_{\rm rms} = \sqrt{\frac{\overline{P}}{R}} = \sqrt{\frac{100\ \rm W}{8.0\ \Omega}} = 3.5\ \rm A$$

أو يمكن استعمال قانون أوم ($V = IR$):

$$I_{\rm rms} = \frac{V_{\rm rms}}{R} = \frac{28\ \rm V}{8\,0\ \Omega} = 3.5\ \rm A$$

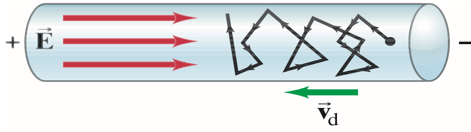
(ب) عندما $\overline{P} = 1.0\ \rm W$.

$$V_{\rm rms} = \sqrt{(1.0\ \rm W)(8.0\ \Omega)} = 2.8\ \rm V$$
$$I_{\rm rms} = \frac{2.8\ \rm V}{8.0\ \Omega} = 0.35\ \rm A.$$

تمرين و: ماذا يجب أن تكون قيمتا جذر متوسط مربع الفولتية والتيار للنظام الصوتي الذي في المثال 13-18 إذا تم توصيل 100 W إلى مكبر صوت مقاومته 4 Ω؟

وضّح هذا البند مقدمة مختصره للخصائص البسيطة للتيار المتردد. وسوف نناقش دارات التيار المتردد بالتفصيل في الفصل 21. وفي الفصل 19 سوف نتعامل مع تفاصيل دارات التيار المستمر فقط.

* 8-18 التيار الكهربائي من وجهة نظر مجهرية

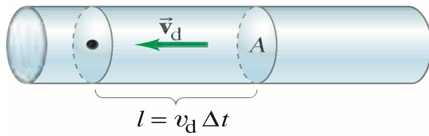


الشكل 24-18: المجال الكهربائي $\vec{E}$ داخل السلك يمنح الإلكترونات عشوائية الحركة سرعة انسياقية v_d.

السرعة الانسياقية

من المفيد تحليل نموذج بسيط للتيار الكهربائي على المستوى المجهري للذرات والإلكترونات. فعلى سبيل المثال في سلك موصل، يمكن تخيل أنّ الإلكترونات الحرة تتحرك عشوائيا بسرعات عالية وتتصادم مع ذرات السلك (إلى حد ما مثل جزيئات الغاز في البندين13-9 و 13-11). عندما ينشأ مجال كهربائي في السلك (الشكل 18-24) بسبب فرق الجهد المؤثر بين طرفيه، تتأثر الإلكترونات بقوة وتبدأ بالتسارع. ولكنها عندما تصل إلى أكثر أو أقل من متوسط سرعة ثابتة (بسبب التصادمات مع ذرات السلك) تُسَمّى حينها **السرعة الانسياقية** v_d. وهذه السرعة الانسياقية تكون عادةً أقلّ من متوسط السرعة العشوائية للإلكترونات.

الشكل 25-18: الإلكترونات في الحجم AL سوف تمر خلال المقطع المستعرض المشار إليه خلال الفترة الزمنية Δt، حيث $l = v_d\,\Delta t$



ومن المفيد أن نربط السرعة الانسياقية v_d مع التيار الجاهري I في السلك. خلال الفترة الزمنية Δt سوف تتحرك الإلكترونات في المتوسط مسافة $l = v_d\,\Delta t$. افترض أن مساحة المقطع المستعرض للسلك A. ففي الفترة Δt، الإلكترونات جميعها التي في الحجم $V = Al = Av_d\,\Delta t$ سوف تمر خلال المقطع المستعرض للسلك، كما في (الشكل 18-25). وإذا كان هناك عدد مقداره n من الإلكترونات الحرة (شحنة كل منها e) لكل وحدة حجم، فإن العدد الكلي للإلكترونات هو $N = nV$ (حيث V هو الحجم وليس الفولتية) والشحنة الكلية ΔQ التي تمر خلال المساحة A في الفترة الزمنية Δt تساوي:

$$\Delta Q = (\text{الشحنة لكل جسيم}) \times (N \text{ عدد الشحنات})$$
$$= (nV)(e) = (nA\,v_d\,\Delta t)(e)$$

وهكذا، فإن التيار I في السلك هو

التيار (متغيرات مجهرية)

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = neAv_d \quad \textbf{(10-18)}$$

المثال 14-18 سرعة إلكترون في سلك.

سلك نحاس قطره 3.2 mm يحمل تياراً شدته 5.0-A. حدد السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرّة. افترض توافر إلكترون واحد لكلّ ذرة نحاس Cu حر الحركة (باقي الإلكترونات تبقى مرتبطة بالذرة).

النهج: يمكن تطبيق المعادلة 18-10 لإيجاد السرعة الانسياقية إذا تمكنا من تحديد العدد n الذي يمثل عدد الإلكترونات الحرة لكل وحدة حجم. بما أننا افترضنا أنّ هناك إلكترونًا واحدًا حرًّ الحركة لكلّ ذرة، فإنّ عدد الإلكترونات الحرة n يساوي عدد ذرات النحاس Cu. الكتلة الذرية للنحاس تساوي 63.5 u (انظر إلى الجدول الدوري على الجانب الداخلي للغطاء الخلفي للكتاب). تحتوي 63.5 g من Cu على مول واحد أو 6.02×10^{23} إلكترون حر. ثم نستعمل كثافة كتلة النحاس (الجدول 10-1) $\rho_D = 8.9 \times 10^3\,\text{kg/m}^3$ لإيجاد حجم هذا المقدار من النحاس، وبالتالي $n = N/V$. (استعملنا PD هنا حتى نميزها عن المقاومية ρ)

الحل: كثافة الكتلة $\rho_D = m/V$ ترتبط مع عدد الإلكترونات الحرّة لكلّ وحدة حجم، $n = N/V$ من خلال

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{m/\rho_D} = \frac{N\,(1\text{ mole})}{m\,(1\text{ mole})}\rho_D$$
$$= \left(\frac{6.02 \times 10^{23}\text{ electrons}}{63.5 \times 10^{-3}\text{ kg}}\right)(8.9 \times 10^3\text{ kg/m}^3)$$
$$= 8.4 \times 10^{28}\text{ m}^{-3}.$$

مساحة المقطع المستعرض للسلك تساوي

$$A = \pi r^2 = (3.14)(1.6 \times 10^{-3}\text{ m})^2 = 8.0 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

ثم نستخدم معادلة 18-10، فتكون السرعة الانسياقية هي:

$$v_d = \frac{I}{neA} = \frac{5.0\text{ A}}{(8.4 \times 10^{28}\text{ m}^{-3})(1.6 \times 10^{-19}\text{ C})(8.0 \times 10^{-6}\text{ m}^2)}$$
$$= 4.7 \times 10^{-5}\text{ m/s},$$

وهي حوالي 0.05 mm/s فقط.

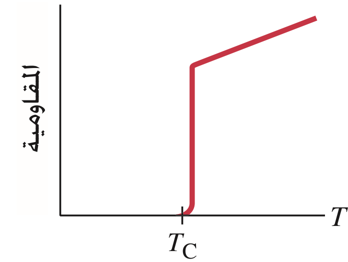
ملحوظة: يمكن مقارنة هذه السرعة الانسياقية مع السرعة الحقيقة لإلكترونات حرة تدور بنشاط داخل الفلز مثل جزيئات في غاز، وقد وجد أن هذه السرعة هي حوالي 1.6×10^6 m/s عند 20°C.

" سرعة" انتقال الكهرباء

السرعة الانسياقية التي تتحرك بها الإلكترونات في سلك ما قليلة جدًّا، حوالي $0.05\ mm/s$ فقط للمثال 18-14، وهذا يعني أنّ الإلكترون يحتاج إلى حوالي $20 \times 10^3\ s$ او $5\frac{1}{2}\ h$ حتى يقطع مسافة $1\ m$. وعلى أيّ حال فإنّه لا يمثل السرعة التي تنتقل بها الكهرباء: عندما تضغط على مفتاح الكهرباء، فإنّ الضوء – حتى ولو كان على بعد عدة أمتار – ينبعث تقريبا بشكل لحظي لأن المجالات الكهربائية تنتقل أساسًا بسرعة الضوء $(3 \times 10^8\ m/s)$. يمكن التفكير في الإلكترونات التي في سلك كما لو أنّها مثل أنبوب يمتلىء تمامًا بالماء: عندما تدخل كمية قليلة من الماء من إحدى نهايتي الأنبوب، يخرج بعض منه تقريبًا بشكلٍ فوريٍّ من الجهة الأخرى للأنبوب.

* 9-18 المواد فائقة الموصلية

عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا، أيْ أقلَّ بكثير من $0°C$، تصبح مقاومية فلزات معينة ومركبات أو سبائك معينة صفراً، كما تم قياسها بوساطة أكثر الأجهزة دقة. تسمى المواد التي في مثل هذه الحالة فائقة الموصلية. وقد كان *H.K,Onnes* (1853-1926) أول من لاحظ هذه الظاهرة في عام 1911 عندما برد الزئبق إلى درجة حرارة أقل من $4.2\ K\ (-269°C)$. وجد *Onnes* أنّ مقاومية الزئبق أصبحت صفرا بشكل مفاجىء عند درجة الحرارة هذه. وبشكل عام ، فإنّ الموصلات فائقة التوصيل تصبح فائقة الموصلية فقط عند درجات حرارة أقل من درجة حرارة التحول أو درجة الحرارة الحرجة T_C. والتي تكون عادة قريبة من الصفر المطلق. لقد لوحظ أن التيار في مادة فائقة الموصلية على شكل حلقة يستمر في التدفق لسنوات في غياب فرق الجهد، ودون أن تنخفض شدته. تبين القياسات أن المقاومية للموصلات فائقة التوصيل أقل من $4 \times 10^{-25}\ \Omega \cdot m$ وهي أقل من تلك التي للنحاس بحوالي 10^{16} مرة وتعد صفرا في النواحي العملية. انظر (الشكل 18-26).



الشكل 18-26: مادة فائقة الموصلية مقاوميتها صفر عندما تكون درجة حرارتها أقل من T_C، "درجة حرارتها الحرجة". عند T_C تقفز المقاومية إلى قيمتها الطبيعية التي لا تساوي صفراً وتزداد مع درجة الحرارة كما لأغلب المواد الأخرى (المعادلة 18-4)

المواد فائقة الموصلية عند درجات حرارة مرتفعة.

لقد أجري العديد من البحوث على المواد فائقة الموصلية في محاولة لمعرفة سبب حدوثها. ولإيجاد مواد يمكن أن تصبح فائقة التوصيل عند درجات حرارة مرتفعة يمكن الوصول إليها بسهولة ولتقليل الثمن والتبريد غير المناسب عند درجات الحرارة المنخفضة المطلوب الوصول إليها. قبل عام 1986 كانت أعلى درجة حرارة تصبح عندها مادة ما فائقة التوصيل $23\ K$ وهذا يتطلب هيليوما سائلا لحفظ المادة مبردة. ففي عام 1987 تم تطوير مركب من يتريوم، باريوم، نحاس، وأكسجين (*YBCO*) يمكن أن يصبح فائق الموصلية عند $90\ K$. وبما أن درجة الحرارة هذه أعلى من درجة غليان النيتروجين السائل $77\ K$ فإن النيتروجين السائل يكفي لإبقاء المادة فائقة التوصيل. ويعد هذا التقدم مهما؛ لأنّه يمكن الحصول على النيتروجين السائل بسهولة وبثمن أقل من الهيليوم السائل الذي تحتاج إليه المواد فائقة التوصيل الاعتيادية. ومنذ ذلك الحين، تم تسجيل مواد فائقة الموصلية عند درجات حرارة تصل إلى $160\ K$ إلا أنها مركبات هشة.

وهناك أبحاث كثيرة لا زالت تجري لتطوير مواد فائقة الموصلية درجة حرارة تحولها T_C مرتفعة لتعمل كأسلاك تستطيع أن تحمل تيارات كهربائية شدتها كافية لتستعمل في النواحي العملية. تستعمل أكثر التطبيقات حاليا بزموث، سترنشيوم، كالسيوم، نحاس، أكسجين ويعرف اختصارا بـ *BSCCO*. إلا أن المشكلة الرئيسة تكمن في عمل سلك قابل للاستعمال والثني من *BSCCO* وهو مادة هشة. أحد الحلول لهذه المشكلة هو غرس أسلاك فلزية دقيقة من مواد فائقة التوصيل درجة حرارة تحولها مرتفعة في مادة ترابط سبيكة فلزية بحيث يلف السلك فائق الموصلية حول أنبوب يحمل نيتروجينا سائلا حتى يبقى *BSCCO* عند درجة حرارة أقل من T_C. لايمكن أن يكون السلك عديم المقاومة بسبب توصيلات الفضة. ولكن المقاومة تبقى أقل بكثير من مقاومة سلك النحاس العادي.

* 10-18 التوصيل الكهربائي في النظام العصبي للانسان

يعدّ النظام العصبي للإنسان أحد الأمثلة المثيرة على تدفق التيار؛ فهو الذي يزودنا بالوسائل اللازمة لإدراك العالم، والاتصال ضمن الجسم والسيطرة على عضلات الجسم. وبالرغم من أن تفاصيل عمل النظام العصبي الضخم والمعقد مازالت غير مفهومة تماما، إلا أن لدينا معرفة معقولة عن كيفية إرسال الرسائل ضمن النظام العصبي؛ إنها إشارات كهربائية تمر عبر العنصر الأساسي للنظام العصبي: الخلية العصبية.

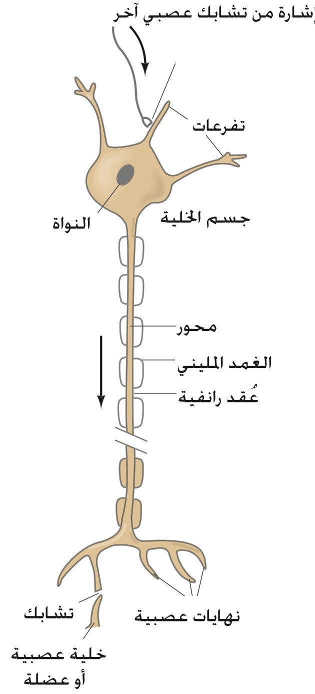
فالخلايا العصبية عبارة عن خلايا حية ذات أشكال غير عادية (الشكل 18-27). ترتبط مع خلية الجسم الأساسية مجموعة من التذيلات تسمى زوائد شجرية. وذيل طويل يسمى محور الخلية العصبية. تستقبل الإشارات بواسطة الزوائد الشجرية. ثم تنتشر على طول محور الخلية العصبية. عندما تصل إشارة ما إلى نهايات العصب. فإنها تنتقل إلى الخلية التالية أو الى عضلة عند وصلة تسمى الوصلة العصبية. (بعض الخلايا العصبية لها خلايا منفصلة تُسَمّى خلايا شوان. تلف حول محاورها: تشكل هذه الخلايا طبقة عازلة تسمى الغمد النخاعي وتساعد في عزل الخلايا العصبية بعضها عن بعض).

تؤدي الخلايا العصبية ثلاث وظائف: **فالخلايا العصبية** الحسية تحمل الرسائل من العيون، والأذان، والجلد، والأعضاء الأخرى إلى النظام العصبي المركزي الذي يتكون من الدماغ والحبل الشوكي. في حين تحمل "الخلايا العصبية المحركة " الإشارات من النظام العصبي المركزي إلى عضلات معينة، ويمكن أن تجعلها تتقلص. هذان النوعان من الخلايا العصبية تشكلان النظام العصبي الخارجي" لتميزه عن النظام العصبي المركزي. أما النوع الثالث من الخلايا العصبية فهو الخلايا العصبية الداخلية التي تنقل الإشارات بين الخلايا العصبية. توجد الخلايا العصبية الداخلية في الدماغ والعمود الفقري، وغالبا ما تتصل مع بعضها لتشكيل تجمع معقد بشكل لا يصدق.

وقبل أن تقوم الخلية العصبية بنقل إشارة كهربائية تكون في حالة تُسَمّى " حالة السكون". وللخلايا العصبية، مثلها مثل الخلايا الحية جميعها شحنة موجبة صافية على السطح الخارجي لغشاء الخلية وشحنة أخرى سالبة على السطح الداخلي كما بينا في البند 11 - 17 بالنسبة إلى عضلات القلب و ECG. وهذا الاختلاف في الشحنة أو "التناقطبي " يعني وجود فرق جهد عبر غشاء الخلية. عندما لا تقوم الخلية العصبية بإرسال إشارة، فيعبر عن " جهد السكون" هذا كما يلي:

$$V_{\text{داخلي}} - V_{\text{خارجي}}$$

ويتراوح عادة مابين $-60\ \text{mV}$ إلى $-90\ \text{mV}$، حسب نوع الكائن الحي. أغلب الأيونات الشائعة في خلية هي: Na^+ , K^+ و Cl^-. هناك اختلافات كبيرة في تراكيز هذه الأيونات داخل الخلية وخارجها . كما بينا ذلك في القيم المثالية المعطاة في الجدول 18-2. وهناك أيونات أخرى موجودة أيضا. لذا فإن السوائل داخل محور الخلية وخارجها متعادلة كهربائياً. وبسبب الاختلاف في التركيز، تميل الأيونات للانتشار عبر الغشاء (انظر البند 13-14 عن الانتشار). ومع ذلك، يمنع غشاء الخلية في حالة السكون أي تدفق صاف لـ Na^+ (من خلال آلية الضخ الفاعل لـ Na^+ خارج الخلية). ولكنه يسمح بتدفق أيونات Cl^- وكمية أقل من أيونات K^+. وهذان النوعان من الأيونات يشكلان طبقة شحنة ثنائية القطب على الغشاء. بما أن تركيز K^+ داخل الخلية أكثر منه خارجها، فإن أيونات K^+ تميل للانتشار نحو الخارج عبر الغشاء أكثر منه نحو الداخل. إنّ أيون K^+ الذي يمرّ عبر الغشاء يرتبط بالسطح الخارجي للغشاء، ويترك خلفه شحنة سالبة مكافئة تقع على السطح الداخلي للغشاء (الشكل 18 - 28). أما السوائل نفسها فتبقى متعادلة كهربائياً. في الواقع، إن ما يبقي الأيونات على الغشاء هو جذبها لبعضها بعضا عبر الغشاء. وبشكل مستقل عن هذه العملية، تميل أيونات Cl^- للانتشار إلى داخل الخلية؛ لأن تركيزها في الخارج أعلى. إن انتشار كل من K^+ و Cl^- يميل إلى جعل السطح الداخلي للغشاء مشحوناً بشحنة سالبة، والسطح الخارجي مشحوناً بشحنة موجبة. ونتيجة لتراكم الشحنة على سطح الغشاء، تزداد صعوبة انتشار أيونات أكثر. على سبيل المثال، تحاول أيونات K^+ الحركة نحو الخارج ولكنها تتنافر مع الشحنة الموجودة هناك. يحصل الاتزان عندما يوازن الميل للانتشار بسبب اختلاف التركيز بوساطة فرق جهد كهربائي عبر الغشاء. وكلما كان اختلاف التركيز أكبر، يزداد فرق الجهد عبر الغشاء، وهو كما أشرنا سابقا يتراوح بين $-60\ \text{mV}$ إلى $-90\ \text{mV}$.

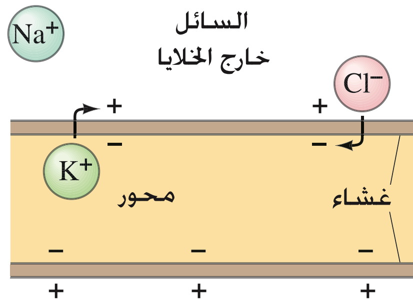


الشكل 18-27: مخطط بسيط للخلية العصبية العادية.

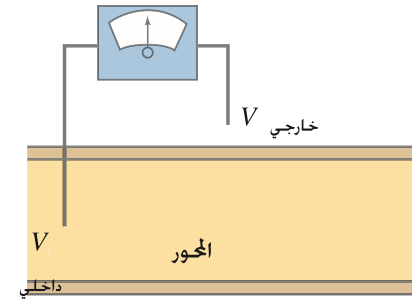
الجدول 18-2: تركيز الأيونات داخل المحور وخارجه

	التركيز داخل المحور (mol/m³)	التركيز خارج المحور (mol/m³)
K^+	140	5
Na^+	15	140
Cl^-	9	125

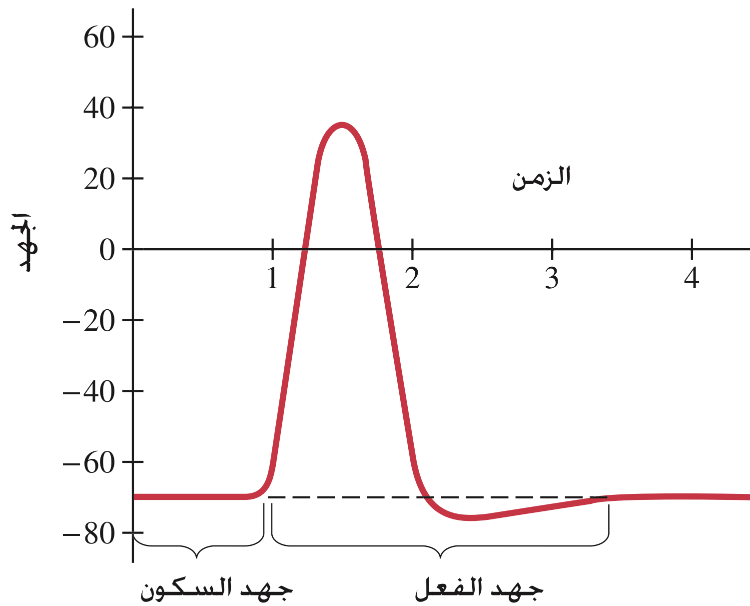
الشكل 18-28: كيف تتشكل طبقة شحنية ثنائية القطب على غشاء خلية.



إنّ أكثر خاصية مهمّة للخلية ليس جهد السكون الذي لديها (أكثر الخلايا لديها ذلك)، ولكن قدرتها على الاستجابة لمحفز وتوصيل إشارة كهربائية على طولها. ويمكن تحفيز العصب بعدة طرق؛ حراريًّا (عندما تلمس فرناً ساخناً) أو كيميائيًّا (كما في حليمات التذوق)، أو ضغطًا (على الجلد أو طبلة الأذن) أو ضوءا (كما في العين)، وقد يكون المحفز كهربائيا لإشارة قادمة من الدماغ أو خلية عصبية أخرى. في المختبر، عادة ما يكون المحفز كهربائياً يؤثر بوساطة مسبار دقيق جدا عند نقطة ما على الخلية العصبية. إذا تجاوز المحفز حدًا معينًا، تنتقل ذبذبة الفولتية إلى أسفل محور الخلية. ويمكن الكشف عن ذبذبة الفولتية هذه عند نقطة ما على محور الخلية بوساطة فولتميتر أو جهاز رسم الذبذبات، يوصل كما في (الشكل 18-29). إنّ ذبذبة الفولتية هذه لها الشكل الموضح في (الشكل 18-30)، وتُسَمّى **جهد الفعل**. كما يمكن ملاحظة أنّ الجهد يزداد من جهد سكون مقداره حوالي $-70\ \text{mV}$ ويصبح موجبا $30\ \text{mV}$ أو $40\ \text{mV}$. يستمر جهد الفعل إلى حوالي $1\ \text{ms}$ وينتقل إلى أسفل محور الخلية العصبية بسرعة $30\ \text{m/s}$ إلى $150\ \text{m/s}$. عندما يحفز جهد الفعل، يقال بأن العصب "انفعل".



الشكل 18-29: قياس فرق الجهد بين داخل خلية عصبية وخارجها.



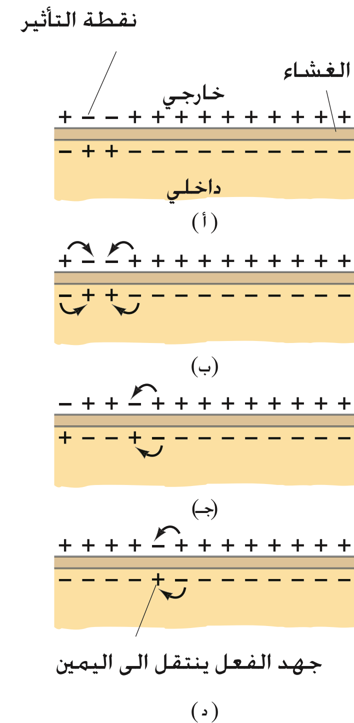
الشكل 18-30: جهد الفعل

ما الذي يسبب جهد الفعل؟ على ما يبدو أن غشاء الخلية له القدرة على تعديل خصائص نفاذيته. وعند النقطة التي يحدث عندها التحفيز، يصبح الغشاء فجأة أكثر نفاذية لـ K^+ من أيونات K^+ و Cl^-؛ لذلك فإن أيونات Na^+ تسرع إلى الخلية، ويصبح السطح الداخلي لجدار الخلية موجب الشحنة، ويوجه فرق الجهد بسرعة ليصبح موجبًا $(\approx +30\ \text{mV})$ كما في الشكل (18-30). وعندما يعود الغشاء فجأة إلى صفاته الأصلية، فإنه يصبح غير نفاذ لـ Na^+، وفي الحقيقة فإنه يضخ أيونات Na^+ إلى الخارج. ثم يسود مرة أخرى انتشار أيونات K^+ و Cl^- ويسترجع جهد السكون $(-70\ \text{mV})$ في الشكل (18-30).

ما الذي يجعل جهد الفعل ينتقل على طول محور الخلية العصبية؟ يحدث جهد الفعل عند نقطة التحفيز كما هو مبين في (الشكل 18-31أ). وعند هذه النقطة، يكون الغشاء بشكل مؤقت موجبًا على الداخل وسالبًا على الخارج. تنجذب الشحنات المجاورة نحو هذه المنطقة كما في (الشكل 18-31ب). يهبط الجهد في هذه المناطق المتجاورة ويسبب نشوء جهد الفعل فيها. لذا، عندما يعود الغشاء إلى وضعه الطبيعي عند النقطة الأصلية. فإن المكان القريب منها يتأثر بجهد الفعل، وعليه، فإن جهد الفعل ينتقل إلى أسفل محور الخلية العصبية (الشكلان 18-31 ج و د).

وقد تتساءل: هل يغيّر عدد الأيونات الذي يعبر خلال الغشاء التراكيز بشكل ملحوظ. الجواب: لا. ويمكن أن نبين لماذا إذا افترضنا محور الخلية العصبية كمكثف كما في المثال التالي:

الشكل 18-31: انتشار جهد الفعل على طول غشاء محور الخلية العصبية.



المثال 18-15 تقدير مكثف محور الخلية العصبية

(أ) اعمل تقديرًا لرتبة المقدار لمكثف محور خلية عصبية طوله 10 cm ونصف قطره $10\ \mu m$. سمك الغشاء حوالي 10^{-8} m وثابت العزل حوالي 3. (ب) بأيّ معامل يتغير تركيز (عدد الأيونات في ذلك الحجم) أيونات Na^+ في الخلية نتيجة لجهد الفعل الواحد؟

النهج: نعمل نموذجا لغشاء محور الخلية العصبية ليكون مواسعاً متوازي اللوحين أسطواني الشكل، شحنة كل لوح تخالف شحنة اللوح المقابل. والمسافة بين اللوحين هي سمك الغشاء $d \approx 10^{-8}$ m. نحسب أولا مساحة الأسطوانة، ثم نستعمل المعادلة 17-9، $C = K\epsilon_0 A/d$. لإيجاد المكثف. (ب) في هذا الجزء، نستعمل تغير الفولتية خلال جهد الفعل الواحد لإيجاد كمية الشحنة التي تتحرك عبر الغشاء.

الحل: (أ) المساحة A هي مساحة أسطوانة نصف قطرها r وطولها l

$$A = 2\pi rl \approx (6.28)(10^{-5}\ m)(0.1\ m) \approx 6 \times 10^{-6}\ m^2$$

من المعادلة17-9، نجد أن:

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \approx (3)(8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N\cdot m^2)\frac{6 \times 10^{-6}\ m^2}{10^{-8}\ m} \approx 10^{-8}\ F$$

(ب) بما أنّ الفولتية تتغير من -70 mV إلى حوالي $+30$ mV، فإنّ التغير الكلي حوالي 100 mV. وبالتالي فإن كمية الشحنة التي تتحرك تساوي:

$$Q = CV \approx (10^{-8}\ F)(0.1\ V) = 10^{-9}\ C$$

كل أيون يحمل شحنة $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. لذلك فإنّ عدد الأيونات التي تتدفق لكل جهد فعل تساوي:

$$Q/e = (10^{-9}\ C)/(1.6 \times 10^{-19}\ C) \approx 10^{10}$$

حجم محور الخلية العصبية الأسطواني الشكل يساوي:

$$V = \pi r^2 l \approx (3)(10^{-5}\ m)^2(0.1\ m) = 3 \times 10^{-11}\ m^3$$

تركيز أيونات Na^+ داخل الخلية (الجدول 18-2) يساوي:

$$15\ mol/m^3 = 15 \times 6.02 \times 10^{23}\ ions/m^3 \approx 10^{25}$$

لذا، فإنّ عدد أيونات Na^+ الموجودة داخل الخلية هو:

$$(10^{25}\ ions/m^3) \times (3 \times 10^{-11}\ m^3) \approx 3 \times 10^{14}$$

وهكذا، فإن جهد الفعل الواحد سوف يغير تركيز أيونات Na^+ بحوالي $10^{10}/(3 \times 10^{14}) = \frac{1}{3} \times 10^{-4}$، أو جزء من 30,000. وهذا التغير في التركيز صغير جدًّا بحيث لا يمكن قياسه.

وهكذا، فإنّ 1000 فعل سوف لن تعدل التركيز بشكل ملحوظ. وبالتالي فليس من الضروري أن تقوم مضخة الصوديوم بإزالة أيونات Na^+ بسرعة بعد كل جهد فعل، ولكن يمكن أن تعمل ببطء طوال الوقت حتى تحافظ على تركيز ثابت نسبيا.

إن انتشار ذبذبة عصبية كما وصف هنا يطبق على محور خلية عصبية لا نخاعية. أما محاور الخلايا العصبية النخاعية من جهة أخرى، فإنها معزولة من السائل الذي خارج الخلية بوساطة الغمد النخاعي إلا عند عقد رانفير *(Nodes of Ranvier)* (الشكل 18-27). لا يمكن أن يتولد جهد الفعل حيثما يكون الغمد النخاعي. وحالما تحفز مثل هذه الخلية العصبية، تستمر الذبذبة في الانتقال على طول الغشاء، ولكن بوجود مقاومة؛ وبالتالي تصبح الذبذبة أصغر كلما تحركت إلى أسفل محور الخلية العصبية. ومع ذلك، فإن الإشارة الضعيفة ما تزال قادرة على تحفيز جهد الفعل بشكل كامل عندما تصل إلى عقدة رانفير. لذا فإن الإشارة تضخم بشكل متكرر عند هذه النقاط. قارن هذه مع خلية عصبية لانخاعية تضخم فيها الإشارة بشكل مستمر بوساطة جهود الفعل المتكررة على طولها، وتحتاج إلى طاقة كثيرة. إنّ تطور الخلايا العصبية النخاعية يمكن أن يعدّ تطورًا مهمًّا؛ لأن ذلك يعني إمكانية إرسال ذبذبات العصب بطاقة أقل. وتنتقل الذبذبات بسرعة أكبر لأن التوصيل الاعتيادي أسرع من تكرار توليد جهود الفعل التي تعتمد سرعتها على تدفق الأيونات عبر الغشاء.

ملخص

تعمل **البطارية الكهربائية** كمصدر فرق جهد ثابت تقريبًا عن طريق تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية. تتكون البطارية البسيطة من قطبين مصنوعين من مادتين مختلفتين ومغمورين في محلول أو معجون يُسَمّى كهرولين (محلول كهربائي).

يشير **التيار الكهربائي** I إلى معدل تدفق الشحنة الكهربائية ويقاس بوحدة **أمبير** (A): $1\ A$ يكافىء $1\ C/s$ الذي يمرّ عبر نقطةٍ ما.

اتجاه التيار الاصطلاحي هو اتجاه تدفق الشحنة الموجبة. إن الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة هي التي تتحرك في سلكٍ ما، وبالتالي فإنّها تتدفق باتجاه يعاكس التيار الاصطلاحي. تكافىء الشحنة التي تتدفق في اتجاهٍ ما، دائما الشحنة السالبة التي تتدفق في الاتجاه المعاكس تقريبًا. يتدفق التيار الاصطلاحي الموجب دائمًا من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض.

تعرف المقاومة R لجهاز ما بوساطة العلاقة

$$V = IR \qquad \text{(2-18)}$$

حيث I التيار الذي يمر في الجهاز عند ما يكون فرق الجهد المؤثر بين طرفيه V. للمواد التي مثل الفلزات تكون R ثابتاً مستقلاً عن V (لذلك $I \propto V$) وهذه النتيجة تسمى قانون أوم. لذلك. فإن التيار القادم من بطارية فولتيتها V يعتمد على مقاومة الدارة R الموصولة بالبطارية.

تؤثر الفولتية عبر جهاز أو بين طرفي سلك. التيار يمر خلال سلك أو جهاز. المقاومة خاصية مميزة للسلك أو الجهاز. وحدة قياس المقاومة هي **الأوم** (Ω). حيث $1\ \Omega = 1\ V/A$. انظر الجدول 18-3.

الجدول 18 - 3: ملخص الوحدات

التيار	$1\ A = 1\ C/s$
فرق الجهد	$1\ V = 1\ J/C$
القدرة	$1\ W = 1\ J/s$
المقاومة	$1\ \Omega = 1\ V/A$

تتناسب المقاومة R لسلك ما عكسيا مع مساحة مقطعه المستعرض A. وتتناسب طرديا مع طوله، وكذلك مع خاصية للمادة تسمى المقاومية:

$$R = \frac{\rho L}{A} \qquad \text{(3-18)}$$

تزداد المقاومية ρ بزيادة درجة الحرارة للفلزات، ولكنها قد تقل بالنسبة لاشباه الموصلات.

المعدل الذي تتحول عنده الطاقة في مقاومة R من كهرباء إلى أشكال أخرى للطاقة (مثل حرارة وضوء) يساوي حاصل ضرب التيار في الفولتية. أي أنّ القدرة المتحوله تقاس بالواط، وتعطى بالعلاقة:

$$P = IV \qquad \text{(5-18)}$$

والتي يمكن كتابتها بالنسبة للمقاومات كمايلي:

$$P = I^2R = \frac{V^2}{R} \qquad \text{(6-18)}$$

وحدة القدرة في النظام الدولي SI هي الواط ($1\ W = 1\ J/s$).

الطاقة الكهربائية الكلية المتحولة في أي جهاز تساوي حاصل ضرب القدرة في الزمن الذي يعمل خلاله الجهاز. وفي النظام الدولي SI للوحدات، تعطى الطاقة بوحدة جول ($1\ J = 1\ W{\cdot}s$)، ولكن شركات الكهرباء تستعمل وحدات أكبر، كيلو واط ساعة ($1\ kWh = 3.6 \times 10^6\ J$).

يمكن أن يكون التيار الكهربائي مستمرًا (dc) وفيه يكون التيار ثابتاً في اتجاه واحد، أو يمكن أن يكون متردّدًا (ac) وفيه يعكس التيار اتجاهه عند تردد معين f، عادة 60 Hz. التيارات المترددة تكون عادة جيبية في الزمن

$$I = I_0 \sin \omega t \qquad \text{(7-18)}$$

حيث $\omega = 2\pi f$، وتولد هذه التيارات بوساطة فولتية مترددة.

تعطى قيم جذر متوسط مربع التيار الجيبي المتردد والفولتية الجيبية كذلك بالعلاقتين:)

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{and} \quad V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \qquad \text{(8-18)}$$

حيث I_0 و V_0 تمثلان قيمتي الذروة. العلاقة الرياضية للقدرة $P = IV = I^2R = V^2/R$ صالحة بالنسبة لمتوسط القدرة في التيارات المترددة عندما تستعمل قيم rms لكل من V و I.

[* التيار الكهربائي في سلك عند المستوى دون المجهري، يُعَدُّ تدفقًا للإلكترونات بسرعة انسياقية بطيئة v_d. يعطي التيار بالعلاقة:

$$I = neAv_d \qquad \text{(10-18)}$$

حيث n عدد الإلكترونات الحرّة لكلّ وحدة حجم، وe شحنة الإلكترون، أمّا A فمساحة المقطع المستعرض للسلك].

[* عند درجات حرارة منخفضة جدًّا، تصبح بعض المواد فائقة الموصلية، وهذا يعني أن مقاومتها الكهربائية تصبح صفرًا].

[* يعمل النظام العصبي في الإنسان من خلال التوصيل الكهربائي: عند انفعال العصب تنتقل إشارة كهربائية كذبذبة فولتية تُسَمّى جهد الفعل].

أسئلـــة

1. ما الكمية التي تقيسها بطارية تصنيفها يعطي بـ أمبير – ساعة ($A{\cdot}h$)؟

2. عند توصيل خلية كهربائية إلى دارة، تتدفق الإلكترونات بعيدا عن الطرف السالب في الدارة. ولكن داخل الخلية، تتدفق الإلكترونات إلى الطرف السالب. فسر ذلك.

3. عندما يشتغل مصباح جيب كهربائي. ما الذي يستهلك في البطارية: تيارها، أم فولتيتها، أم طاقتها، أم قدرتها، أم مقاومتها؟ فسّر ذلك.

4. أحد طرفي بطارية السيارة يقال بأنه موصول مع "الأرض" وبما أنّه ليس متصلا حقيقة مع الأرض، فما المقصود بهذه العبارة؟

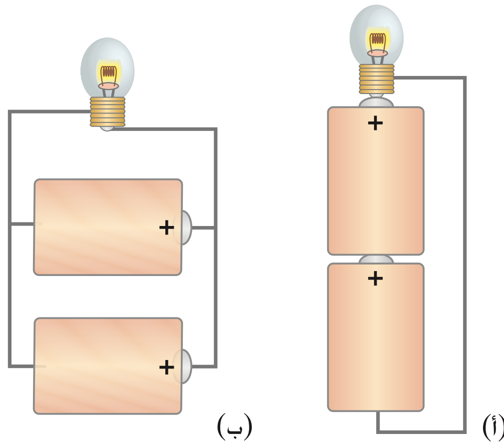
5. عندما يفتح صنبور الماء، يتدفق الماء فورا. ليس من الضروري أن تنتظر الماء حتى يتدفق من صمّام الصنبور إلى المزراب. لم لا؟ هل الشيء نفسه صحيح عند وصل سلك إلى طرفي بطارية؟

6. سلكا نحاس وألمنيوم لهما الطول نفسه. هل يمكن أن يكون لهما المقاومة نفسها؟ فسّر إجابتك.
7. إذا زادت مقاومة سخان صغير يستخدم لتسخين الماء لعمل الشاي أو الشوربة (الشكل 18-32). فهل يسرع ذلك من عملية التسخين. أم يجعلها بطيئة ؟ فسّر ذلك.



الشكل **18-32**: سؤال 7

8. متوازي مستطيلات مصنوع من الكربون أطول جوانبه a ، $2a$ و $3a$. كيف يمكن توصيله مع الأسلاك من البطارية لكي تحصل على: (أ) أقلّ مقاومة؟ (ب) أكبر مقاومة؟
9. تشير المعادلة $P = V^2/R$ إلى أنَّ القدرة التي تستنفد في مقاوم ما تقل إذا قلت قيمة المقاومة. في حين أن المعادلة $P = I^2R$ تتضمن عكس ذلك. هل من تناقض هنا؟ فسّر ذلك.
10. ماذايحدث عندما يحترق فتيل مصباح كهربائي؟
11. وضح لماذا يحترق دائماً فتيل المصباح الكهربائي عند إغلاق مفتاح الكهرباء وليس بعد أن يكون مضاء لبعض الوقت.
12. أيّهما يسحب تياراً كهربائي أكثر: مصباح قدرته 100-W أم مصباح قدرته 75-W؟ أيهما مقاومته أكبر؟
13. تنتقل القدرة الكهربائية على مسافات كبيرة بجهد عال جدًا. وضح كيف يقلل الجهد العالي القدرة المفقودة في خطوط الإرسال.
14. يحترق صمام أمان يتحمل تيارا شدته 15-A بشكل متكرر. لم يعد تبديله بصمام أمان آخر يتحمل تياراً شدته 25-A خطرًا؟
15. عندما تعمل المصابيح الكهربائية على تردد منخفض ac (فرضا 5 Hz) فإنها تضيء بشكل متقطع . لماذا؟
16. تحت تأثير القدرة ac، تعبر الإلكترونات نفسها ذهابًا وإيابًا خلال المصباح مرارًا وتكرارًا. فسّر لماذا يبقى المصباح مضاءً بدلًا من ذهاب إضاءته بعد أول مرور للإلكترونات.
17. يصنع عنصر التسخين في شوّاية ما من سلك نيكروم. وبعد أن تشتغل الشواية مباشرة. فهل يزداد التيار (I_{rms}) في السلك. أم يقل. أم أنه يبقى ثابتا؟ فسر ذلك.
18. هل يستهلك التيار في مقاومة؟ فسر ذلك.
19. قد يتم توصيل البطاريات مع مصابيح مختلفة بأيٍ من الطريقتين الموضحتين في الشكل 18-33. ما فوائد كل مخطط؟



الشكل **18-33**: سؤال 19

مسائل

18 - 2 و 18 - 3 التيار الكهربائي ، المقاومة ، قانون أوم.

(**ملحوظة**: شحنة الإلكترون تساوي 1.60×10^{-19} C).

1. (I) يتدفق تيار شدته 1.30 A في سلك. كم عدد الإلكترونات التي تمر خلال نقطة ما في السلك في كل ثانية؟
2. (I) محطة خدمة تشحن بطارية باستعمال تيار شدته 6.7 A لمدة 5.0 h. كم عدد الشحنات التي تمر خلال البطارية؟
3. (I) ما شدة التيار بالأمبير الذي ينتج من تدفق 1200 Na^+ أيون عبر غشاء خلية في 3.5 μs؟ الشحنة التي على الصوديوم هي الشحنة نفسها التي على الإلكترون، ولكنها موجبة.
4. (I) ما مقاومة محمصة الخبز إذا مرّ فيها تيار شدته 4.2 A من مصدر جهد 120 V؟
5. (I) ماقيمة الفولتية التي تنتج تياراً شدته 0.25 A خلال مقاومة 3800-Ω؟
6. (II) يسحب مجفف شعر تياراً كهربائياً شدته 7.5 A عند توصيله مع مصدر جهد 120-V. (أ) ما مقاومته؟ (ب) كم كمية الشحنة التي تمر خلاله في 15 دقيقة؟ (افترض تياراً مستمراً).
7. (II) يحتوي مجفف الملابس الكهربائي على عنصر تسخين مقاومته 9.6 Ω. (أ) ما شدة التيار في العنصر عند توصيله مع مصدر جهد 240 V؟ (ب)كم كمية الشحنة التي تمر خلال العنصر في 50 دقيقة؟
8. (II) تتصل بطارية 9.0-V مع مصباح كهربائي مقاومته 1.6 Ω. كم عدد الإلكترونات التي تغادر البطارية في كلّ دقيقة؟

9. (II) يقف طائر على خط نقل (dc) للطاقة الكهربائية يحمل تياراً شدته 2800 A (الشكل 18-34). مقاومة السلك $2.5 \times 10^{-5}\,\Omega$ لكل متر. والمسافة بين قدمي الطائر 4.0 cm. ما فرق الجهد بين قدمي الطائر؟



الشكل 18-34: المسألة 9

10. (II) يسحب جهاز كهربائي تياراً شدته 6.50 A عند 240 V. (أ) إذا هبط الجهد 15%. ما شدة التيار على فرض عدم تغيّر شيء آخر؟ (ب) إذا قلت مقاومة الجهاز 15%. فما شدة التيار التي تمر في الجهاز عند جهد 240 V؟

11. (II) يمر تيار شدته 12-V ناتج من بطارية $12\text{-}V$ في مقاومة. (أ) ما قيمة المقاومة؟ (ب) كم جولا من الطاقة تفقد البطارية في دقيقة واحدة؟

18-4 المقاومية

12. (I) ما قطر سلك تنجستن طوله 1.00-m ومقاومته 0.32 Ω؟

13. (I) ما مقاومة سلك نحاس طوله 3.5-m وقطره 1.5 mm؟

14. (II) احسب نسبة المقاومة بين سلك ألمنيوم طوله 10.0 m وقطره 2.0 mm إلى سلك نحاس طوله 20.0 m وقطره 2.5 mm.

15. (II) هل يمكن أن يكون لسلك نحاس قطره 2.5-mm المقاومة نفسها لسلك تنجستن مساو له في الطول؟ هاتِ تفاصيل عددية.

16. (II) سلك نحاس مقاومته 10.0 Ω. عند أي نقطة يجب أن يقطع السلك بحيث تساوي مقاومة القطعة الأولى 4.0 أضعاف مقاومة القطعة الأخرى؟ ما مقاومة كل قطعة؟

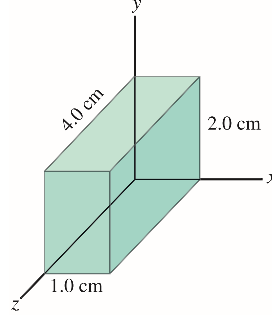
* **17.** (II) بكم يجب أن ترتفع درجة حرارة سلك نحاس (كان في البداية عند درجة حرارة 20°C) حتى تزداد مقاومته بـ 15%؟

* **18.** (II) قدر درجة حرارة النحاس التي تصبح عندها مقاوميته مساوية لتلك التي للتنجستن عند درجة حرارة 20°C.

* **19.** (II) مصباح كهربائي قدرته 100-W ومقاومته حوالي 12 Ω عندما يكون بارداً (20°C) و 140 Ω عندما يكون ساخناً. قدر درجة حرارة فتيل المصباح عندما يكون ساخناً على فرض أن متوسط المعامل الحراري للمقاومية $\alpha = 0.0060\,(\text{C}^\circ)^{-1}$.

20. (II) احسب الهبوط في الجهد على طول سلك طوله 26-m مصنوع من النحاس ورقمه 14 ويستخدم في المنازل (هذا النوع يستعمل في دارات تتحمل تياراً شدته 15-A). قطر السلك 1.628 mm ويحمل تياراً شدته 12-A.

21. (II) متوازي مستطيلات مصنوع من الكربون أطوال أبعاده 1.0 cm , 2.0 cm و 4.0 cm تقع على طول المحاور x , y و z على التوالي. (الشكل 18-35). حدد المقاومة للتيار الذي يمر خلال المادة في الاتجاه (أ) x (ب) y (ج) z. افترض أن المقاومية $\rho = 3.0 \times 10^{-5}\,\Omega \cdot \text{m}$.



الشكل 18-35: المسألة 21

22. (II) سلكان من الألمنيوم لهما المقاومة نفسها. إذا كان طول أحدهما ضعف طول الآخر. فما النسبة بين قطر السلك الأطول وقطر السلك الأقصر؟

* **23.** (II) وصل سلك ألمنيوم مع مصدر قدرة يعطي بدقة 10.00-V. وتم قياس التيار بدقة فكانت شدته 0.4212 A عند درجة حرارة 20.0°C. وضع السلك في بيئة مختلفة درجة حرارتها مجهولة. وقيس التيار فكانت شدته 0.3618 A. ما درجة الحرارة المجهولة؟

24. (III) يتكون سلك طوله 10.0-m من قطعتين: سلك نحاس طوله 5.0 m متبوع بسلك من الألمنيوم طوله 5.0 m وقطر كل منهما 1.0 mm. وضع فرق جهد 85 mV بين طرفي السلك المركب. (أ) ما المقاومة الكلية للسلكين؟ (ب) ما التيار الذي يمر في السلك؟ (ج) ما فرق الجهد بين طرفي الألمنيوم وكذلك بين طرفي النحاس؟

* **25.** (II) من المهم في بعض التطبيقات عدم تغيّر قيمة المقاومة مع درجة الحرارة. فعلى سبيل المثال افترض أنك صنعت مقاومة قيمتها 4.70-kΩ من مقاوم كربون ومقاوم نيكروم على شكل سلك ملفوف. وصلا مع بعضهما بحيث إن المقاومة الكلية هي مجموع مقاومتهما منفصلين. ما القيمة التي يجب أن تكون لكل مقاوم بحيث لا تعتمد مقاومتهما مجتمعين على درجة الحرارة؟

18-5 و 18-6 القدرة الكهربائية

26. (I) يصمم عنصر التسخين في فرن كهربائي بحيث ينتج 3.3 kW من الحرارة عند وصله مع مصدر جهد 240-V. كم يجب أن تكون مقاومة العنصر؟

27. (I) ما أقصى قدرة تستهلك في مسجل CD محمول يتحمل جهد 3.0-V ويسحب تيارا شدته القصوى 320 mA؟

28. (I) ما أقصى فولتية يمكن أن تؤثر بين طرفي مقاوم 2.7-kΩ يتحمل قدرة $\frac{1}{4}$ watt؟

29. (I) (أ) حدد المقاومة والتيار خلال مصباح كهربائي قدرته 75-W يتصل مع مصدر جهد مناسب قيمته 120 V. (ب) أعد ذلك بالنسبة إلى مصباح قدرته 440-W.

30. (II) مدفأة حوض سمك. قدرتها 110 W وتتحمل فرق جهد 115-V احسب التيار الذي يمر خلال المدفأة عندما تعمل. (ب) احسب مقاومتها.

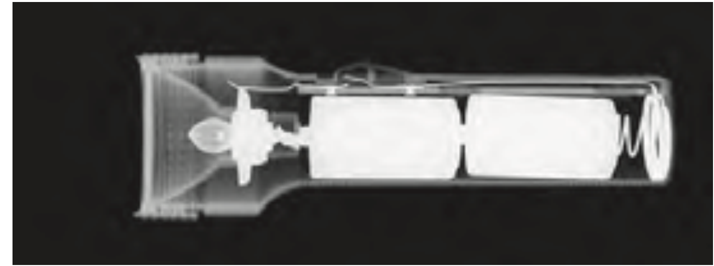
31. (II) مجفف شعر ذو قدرتين $850\ \text{W}$ و $1250\ \text{W}$ ، 120-V A. (أ) عند أي قدرة تتوقع أن تكون المقاومة أكبر. (ب)حدد المقاومة عند كل من القدرة المنخفضة والمرتفعة.

32. (II) اشتريت مصباحاً كهربائياً قدرته 75-W من دولة أوروبيّة، حيث تكون الكهرباء المنزلية $240\ \text{V}$. إذا استعملت هذا المصباح الكهربائي في الولايات المتحدة عند $120\ \text{V}$، (افترض عدم تغيّر مقاومته) كيف تكون إضاءته بالنسبة إلى المصابيح التي قدرتها 75-W وتعمل على فرق جهد 120-V؟ [تلميح : افترض أن شدة الإضاءة تتناسب تقريبا مع القدرة المستهلكة].

33. (II) كم kWh من الطاقة تستهلك أداة تحميص قدرتها 550-W عند استعمالها في الصباح إذا تم تشغيلها ما مجموعه 15 دقيقة؟ بسعر $9.0\ \text{cents/kWh}$ قدر الزيادة على فاتورة الطاقة الكهربائية الشهرية، إذا قمت بتحميص الخبز في الصباح خلال أربعة أيام في الأسبوع.

34. مصباح قدرته 25-W مضاء في شرفة البيت ليلا ونهارا لمدة عام؟

35. (II) يستعمل مصباح الجيب العادي خليتين لبطاريتين فرق الجهد بين طرفي كل منهما 1.5-V وموصولتين على التوالي كما في الشكل 18 - 4ب (الشكل 18 - 36). يسحب فتيل المصباح تياراً شدته $450\ \text{mA}$ عندما يضيء. (أ) احسب مقاومة فتيل المصباح والقدرة المستنفذة. (ب) بأي معامل يجب أن تزداد القدرة إذا استعملت 4 خلايا موصولة على التوالي مع الفتيل نفسه؟ (أهمل تأثير تسخين الفتيل) لماذا يجب عليك عدم محاولة القيام بذلك؟



الشكل **18-36**: المسألة 35

36. (II) ما الكمية الكلية للطاقة التي تختزن في بطارية سيارة من نوع 12-V $85\text{-A}\cdot\text{h}$؟ وما فرق الجهد بين طرفيها عندما تشحن تماماً؟

37. (II) كم عدد المصابيح الكهربائية التي قدرة كل منها 100-W التي يمكن وصلها مع مصدر $120\ \text{V}$ كما في الشكل 18-20 دون أن تتسبب باحتراق صمام أمان يتحمل تياراً شدته 15-A؟

38. (II) حبل توصيل مصنوع من سلكين قطره $0.129\ \text{cm}$ (سلك نحاس رقمه 16) وطوله $2.7\ \text{m}$ (9 أقدام) موصول مع سخان كهربائي يسحب تياراً شدته $15.0\ \text{A}$ من مصدر 120-V. كم القدرة التي تستنفذ في هذا الحبل؟

39. (II) تقدم محطة للطاقة قدرة تساوي $620\ \text{kW}$ عند $12{,}000\ \text{V}$ لمصنع من خلال أسلاك مقاومتها $3.0\ \Omega$. بكم تكون القدرة المفقود أقل إذا زُوِّد المصنع بالكهرباء بجهد $50{,}000\ \text{V}$ بدلا من $12{,}000\ \text{V}$؟

40. (III) التيار الكهربائي الذي يمر في مغناطيس كهربائي من مصدر جهد 240-V يساوي $17.5\ \text{A}$. عند أي معدل يجب أن يمر ماء التبريد على الملفات بحيث لا ترتفع درجة حرارته أكثر من $7.50\ \text{C}^\circ$؟

41. (III)يمكن أن يستعمل سخان صغير في السيارة لتسخين كأس ماء لإعداد فنجان من القهوة أو الشاي. إذا كان باستطاعة السخان تسخين $120\ \text{mL}$ من الماء من 25°C إلى 95°C في 8.0 دقائق. (أ) فكم شدة التيار الذي يسحبه تقريبا من بطارية السيارة 12-V؟ (ب) فما هي مقاومته؟ افترض أن الصانع يدعي أن كفاءته تصل إلى 60%.

7-18 التيار المتردد.

42. (I) احسب تيار الذروة في مقاوم $2.2\text{-k}\Omega$. موصول مع مصدر جهد متردد 220-V rms. **43.** (I) فولتية تيار متردد (ac). قيمة ذروته تساوي $180\ \text{V}$ موصولة بين طرفي مقاوم قيمته $330\text{-}\Omega$. ما قيم rms والذروة للتيار في المقاوم؟

44. (II) قدر المقاومة للدارات الكهربائية التي في منزلك والتي تعمل على جهد $120\text{-V}_{\text{rms}}$، كما تراها شركة الطاقة عندما: (أ) يكون كل شي كهربائي غير موصول كهربائياً.(ب) يكون هناك فقط مصباح كهربائي قدرته 75-W وفتيله محروقا؟

45. (II) قيمة الذروة لتيار متردد في جهاز قدرته 1500-W تساوي $5.4\ \text{A}$ ما فولتية rms بين طرفيه؟

46. (II) جهاز لحام قدرته 1800-W موصول مع مصدر متردد $660\text{-V}_{\text{rms}}$. احسب: (أ) فولتية الذروة. (ب) تيار الذروة .

47. (II)(أ) ما القدرة اللحظية القصوى المستنفذة في مضخة قدرتها 3.0-hp موصولة مع مصدر قدرة متردد يساوي $240\text{-V}_{\text{rms}}$؟ (ب) ما أقصى شدة للتيار الذي يمر في المضخة؟

48. (II) سخان كهربائي مقاومة ملفه $34\ \Omega$ موصول مع مصدر جهد متردد قيمته $240\text{-V}_{\text{rms}}$ (أ) ما متوسط القدرة المستعملة؟ (ب) ما أقصى قيمة وأقل قيمه للقدرة اللحظية؟

* 8-18 التيار الكهربائي من وجهة نظر دون مجهرية .

* **49.** (II) سلك نحاس قطره 0.65-mm يمر فيه تيار شدته $2.3\ \mu\text{A}$. ما السرعة الانسياقية للإلكترون في السلك؟

* **50.** (II) سلك طوله 5.80-m وقطره 2.0-mm يمر فيه تيار شدته 750-mA عندما يؤثر فرق جهد $22.0\ \text{mV}$ بين طرفيه. إذا كانت السرعة الانسياقية $1.7\times10^{-5}\ \text{m/s}$، فحدد: (أ) مقاومة السلك. (ب) مقاومية السلك. (ج) عدد الإلكترونات الحرة لكل وحدة حجم.

* **51.** (III) عند نقطة عالية في الغلاف الجوي للأرض، تتحرك أيونات He^{2+} بتركيز $2.8\times10^{12}/\text{m}^3$ نحو الشمال بسرعة $2.0\times10^6\ \text{m/s}$. وكذلك تتحرك أيونات O_2^- بتركيز $7.0\times10^{11}/\text{m}^3$ نحو الجنوب بسرعة $7.2\times10^6\ \text{m/s}$. حدد مقدار التيار الكلي الذي يمر في وحدة مساحة (A/m^2) واتجاهه.

* 10-18 توصيل الكهرباء في العصب

* **52.** (I) ما مقدار المجال الكهربائي عبر غشاء محور الخلية العصبية التي سمكها $1.0\times10^{-8}\ \text{m}$ إذا كان جهد السكون يساوي $-70\ \text{mV}$؟

* **53.** (II) تحفز خلية عصبية بوساطة ذبذبة كهربائية ويكشف عن جهد الفعل عند نقطة تبعد $3.40\ \text{cm}$ إلى أسفل محور الخلية بعد مرور $0.0052\ \text{s}$. عندما يكشف عن جهد الفعل عند نقطة تبعد $7.20\ \text{cm}$ من نقطة التحفيز نحتاج إلى $0.0063\ \text{s}$. ما سرعة الذبذبة الكهربائية على طول محور الخلية؟ (لماذا نحتاج إلى قياسين بدلا من قياس واحد)؟

* **54.** (III) قدر الطاقة المطلوبة لنقل جهد فعل واحد على طول محور الخلية التي في المثال 18-15 (تلميح: الطاقة اللازمة لنقل ذبذبة واحدة تعادل الطاقة المختزنة في مكثف محور الخلية المشحونة. انظر البند 9-17). ما الحد الأدنى لمتوسط القدرة التي تحتاج إليها 10^4 خلية عصبية يبعث كل منها 100 ذبذبة في الثانية؟

* **55.** (III) خلال جهد الفعل، تتحرك أيونات Na^+ داخل الخلية بمعدل حوالي $3\times10^{-7}\ \text{mol/m}^2\cdot\text{s}$. ما القدرة التي يجب أن ينتجها نظام مضخة Na^+ فاعل حتى يحدث هذا التدفق عكس فرق جهد $+30\text{-mV}$؟ افترض أن طول محور الخلية $10\ \text{cm}$ وقطره $20\ \mu\text{m}$.

مسائل عامة

56. كم كولومًا يُوجد في 1.00 أمبير – ساعة؟

57. ما متوسط التيار الذي يسحبه ماتور قدرته 1.0-hp وفرق الجهد بين طرفيه 120-V؟ ($1\ hp = 746\ W$)

58. ترك شخص مصابيح سيارته مضاءةً دون قصد. إذا استعمل في كلِّ مصباح من الضوئين الأماميين فتيلًا قدرته 40 W وفي كل مصباح من المصباحين الخلفيين فتيل قدرته 6 W، أي ما مجموعه 92 W. كم تدوم بطارية جديدة فرق الجهد بين طرفيها 12-V والبطارية من نوع 95 A·h؟ افترض أن فرق الجهد 12 V يظهر بين طرفي كل مصباح.

59. طول عنصر التسخين في سخان قدرته 1500-W وفولتيته 110-V يساوي 5.4 m. إذا صنع عنصر التسخين هذا من الحديد، فكم يجب أن يكون قطره؟

60. تعرف الموصلية G لجسم ما على أنها مقلوب المقاومة R؛ أي أن $G = 1/R$. وحدة قياس الموصلية هي $mho\ (= ohm^{-1})$ والتي تعرف أيضا سمنز (S). ما موصلية (بوحدة سمنز) جسم ما يسحب تياراً شدته 730 mA عند 3.0 V؟

61. تحتاج مدينة صغيرة إلى قدرة تصل إلى 10 MW. افترض أنه بدلا من تزويدها بالقدرة من خلال خطوط الجهد العالي، تم تزويدها بالقدرة عند جهد 120 V. افترض خطًّا مكونًا من سلكين، قطر سلك النحاس 0.50-cm. قدّر تكلفة الطاقة التي تتحول إلى حرارة في كل ساعة لكل متر. افترض تكلفة الكهرباء هي حوالي 10 سنتات لكل kWh.

62. (أ) يستعمل منزل معين سخّانًا قدرته 1.8-kW لمدة 3.0 h كل يوم، وأربعة مصابيح قدرة كل منها 100-W لمدة 6.0 h يوميا، وفرنا كهربائيا قدرته 3.0-kW لما مجموعه 1.4 h يوميًّا، وأجهزة متفرقة بقدرة تقارب 2.0 kWh يوميا. إذا كانت تكلفة الكهرباء $0.105 لكل kWh، فما قيمة فاتورة الطاقة الشهرية (30 يوما) لهذا المنزل؟ (ب) كم كمية الفحم (التي تنتج 7000 kcal/kg) التي يجب أن تحرق بوساطة محطة توليد طاقة فاعليتها 35% لتزويد هذا المنزل بحاجته السنوية من الطاقة؟

63. قطع سلك إلى نصفين ثم لُفّا مع بعضهما جنبا إلى جنب ليشكلا سلكاً أثخن. كم تكون مقاومة هذه المجموعة الجديدة مقارنة مع السلك الأصلي؟

64. صُمم مجفف شعر قدرته 1200-W لفرق جهد 117 V. (أ) ماذا تكون النسبة المئوية للتغير في القدرة الناتجة إذا هبط الجهد إلى 105 V؟ افترض عدم تغير المقاومة. (ب) كيف يؤثر التغير الحقيقي في المقاومية مع درجة الحرارة في إجابتك؟

65. يجب أن تكون أسلاك التوصيل المنزلية ثخينة بشكل كاف بحيث لا تصبح ساخنة وتشكل بداية حريق. ما القطر الذي يجب أن يكون لسلك نحاس كي يحمل تيارًا شدته القصوى 35 A و لاتنتج منه حرارة أكثر من 1.8 W لكل متر من طوله.

66. افرض أنّ تيارًا يُعطى بالمعادلة $I = 1.80 \sin 210t$، حيث I يقاس بالأمبير و t بالثواني. (أ) ماقيمة التردد؟ (ب) ما قيمة rms للتيار؟ (ج) إذا كان هذا التيار يمر في مقاوم 42.0-Ω، فاكتب المعادلة التي تصف الفولتية كدالة في الزمن.

67. فـرن ميكروويـف يعمـل بفاعليـة 65%، ويـزود داخلـه بطاقة 950 W في كل ثانية. جد: (أ) الطاقة التي تسـحب من المصدر. (ب) التيار المسـحوب. افترض أن جهد المصدر 120 V.

68. سُحب سلك مقاومته 1.00-Ω بانتظام حتى أصبح طوله ثلاثةُ أضعاف طوله الأصلي . كم مقاومته بعد السحب؟

69. وصل فرق جهد 220 V إلى موصلين مختلفين مصنوعين من المادة نفسها. أحد الموصلين أطول بمرتين، وقطره أكبر بمرتين من الآخر كذلك. ما نسبة القدرة المتحولة في الموصل الأول بالنسبة إلى الموصل الثاني؟

70. تستعمل مدفأة كهربائية في تدفئة غرفة حجمها $62\ m^3$. يدخل الهواء إلى الغرفة بدرجة حرارة 5°C ويستبدل تمامًا مرّتين كلّ ساعة. تتسرب الحرارة خلال الجدران بكمية تساوي 850 kcal/h تقريبًا. حتى تبقى درجة حرارة الهواء داخل الغرفة 20°C. ما أقل قدرة يجب أن تكون للمدفأة (الحرارة النوعية للهواء حوالي $0.17\ kcal/kg \cdot C°$).

71. وصل فرن قدرته 2200-W مع مصدر جهد 240-V. (أ) ما مقاومة الفرن؟ (ب) كم الزمن الذي يستغرقه حتى يرفع حرارة 120 mL من الماء من 15°C إلى 100°C على فرض أنّ فاعليته 75%؟ (ج) كم تكلفة ذلك على فرض 11 cents/kWh؟

72. تستعمل سيارة كهربائية بطاريات التخزين على أنّها مصدر للطاقة. كتلة السيارة 1560 kg وتغذى بوساطة 24 بطاريّةً كلٍّ منها 12 V, 95 A·h. افترض أنّ السيارة تسير على طرق مستوية بمتوسط سرعة 45 km/h وبمتوسط قوة احتكاك 240 N. افترض فاعلية مقدارها 100% وأهمل الطاقة المستعملة للتسارع. لا يستهلك أي مقدار من الطاقة عندما تقف السيارة لأنّ المحرك ليس بحاجة إلى أن يدور. (أ) حدد القدرة المطلوبة بوحدة hp. (ب) بعد كم كيلومترا تقريبا يجب إعادة شحن البطاريات؟

73. مقاوم 12.5-Ω مصنوع من ملف سلك نحاس كتلته الكلية 18.0 g. ما قطر هذا السلك و طوله؟

74. مصباح كهربائي 100-W , 120-V مقاومته 12 Ω عندما يكون باردًا (20°C) و 140 Ω عندما يكون ساخناً. احسب استهلاكه للطاقة: (أ) عند اللحظة التي يضيء فيها. (ب) بعد لحظات قليلة عندما يسخن.

* 75. صُمّم مسارع تيفترون في مختبر فيرمي (إلينوي) ليحمل تيارًا 11-mA ناجًا من حزمة بروتونات تسير بشكل قريب جدًّا من سرعة الضوء $(3.0 \times 10^8\ m/s)$ حول حلقة محيطها 6300 m. كم عدد البروتونات التي تشكل هذه الحزمة؟

76. يسحب مكيف هواء تياراً شدته 12 A من مصدر متردد 220-V. حبل التوصيل سلك نحاس قطره 1.628 mm. (أ) ما كمية الطاقة التي يسحبها المكيف؟ (ب) إذا كان الطول الكلي للسلك 15 m، فكم كمية الطاقة التي تستنفذ في أسلاك التوصيل؟ (ج) إذا استعملنا سلكًا آخر رقمه 12 وقطره 2.053 mm بدلا منه، فكم كمية الطاقة التي يجب أن تستنفذ؟ (د) افترض أنّ مكيف الهواء يعمل لمدة 12 h كل يوم، فكم المبلغ الذي يتم توفيره شهريًا (30يوما) باستعمال سلك رقمه 12؟ افترض أنّ تكلفة الكهرباء 12 سنتًا لكلّ kWh.

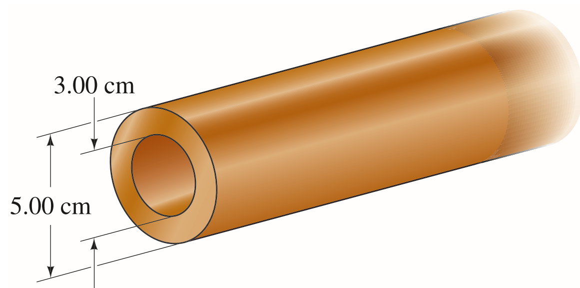
77. مدفأة حوض سمك قدرتها 95 W عند توصيلها مع مصدر جهد 120 V. عنصر التسخين في المدفأة عبارة عن ملف من سلك نيكروم. عندما لا يكون السلك ملفوفًا، يكون طوله الكلي 3.8 m. ما قطر هذا السلك؟

78. يتغير نظام الجهد في سيارة من حوالي 12 V عندما لا تشتغل إلى 13.8 V عند اشتغالها وعمل نظام الشحن، وهذا يشكل فارقًا مقداره 15%. ما النسبة المئوية التي تتغير فيها القدرة التي تزود الضوئين الأماميين عندما يتغير الجهد من 12 V إلى 13.8 V؟ افترض أن مقاومة فتيل المصباح الأمامي تبقى ثابتة.

79. مصباح كهربائي A قدرته 40 W، ويتحمل جهد 120 V يستعمل منزليًّا. ومصباح كهربائي آخر B قدرته 40 W، ويتحمل جهد 12 V يستعمل في السيارات.(أ) كم التيار الذي يمرّ خلال كلّ مصباح؟ (ب) ما مقاومة كل مصباح؟ (ج) ما الشحنة التي تمرّ في كلّ مصباح في ساعة واحدة؟ (د) كم كمية الطاقة التي يستعملها كلّ مصباح في ساعة واحدة؟ (ه) أي من المصباحين يجب أن يكون قطر أسلاكه أكبر حتى يتمّ توصيله مع مصدر قدرته.

80. سلك نحاس قطره 0.259 cm يستعمل لتوصيل مجموعة من الأجهزة الكهربائية المنزلية إلى مصدر جهد 120 V، بحيث تكون القدرة الكلية التي تسحبها 2250 W. (أ) ما القدرة التي تستنفد في 25.0 m من هذا السلك؟ (ب) ما إجابتك إذا استعمل سلك قطره 0.412 cm؟

81. أنبوب من النحاس، قطره الداخلي 3.00 cm وقطره الخارجي 5.00 cm (الشكل 18-37). ما مقاومة 10.0 m من هذا الأنبوب؟



الشكل **18-37**: المسألة 81

82. سحب سلك مقاومته R بانتظام بحيث أصبح طوله ضعف الطول الأصلي، بأيّ عامل تتغير القدرة المستنفذة في السلك، على فرض أنّه بقي موصولًا مع مصدر الجهد نفسه؟

* **83.** يستعمل فتيل تنجستن في مصباح جيب يعمل عند جهد 3.2 V وتيار 0.20 A. إذا كانت مقاومته عند درجة حرارة 20°C تساوي 1.5 Ω. فما درجة حرارة الفتيل عندما يشتغل المصباح؟

إجابات التمارين

أ: 1.6×10^{-13} A

ب: 240 Ω

ج: 110 m

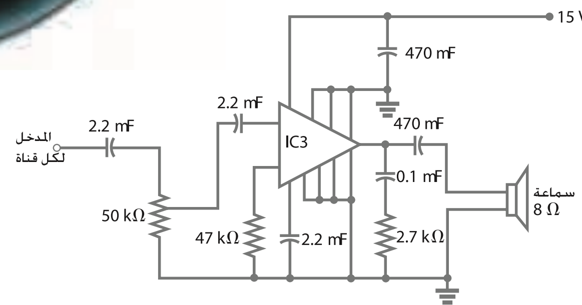
د: 370,000 kg أو حوالي 5000 شخص

هـ: 1800 W عند جهد 120 V يسحب تيارًا شدته 15-A. الأسلاك التي في حبل التوصيل تتحمل تيارًا شدته 11 A، لذا من الممكن أن تصبح ساخنة بشكل كاف بحيث تصهر العازل وتسبّب حريقًا.

و: 20 V, 5.0 A

تحتوي هذه المسجّلة المحمولة (Mp3-CD) على دارات تيار مستمر (dc)، على الأقلّ بشكل جزئي (الإشارة السمعية فيه ac). ويبين المخطط أدناه دائرة مضخم يمكن استعماله في كلّ نظام صوتي. وعلى الرغم من أنّ المثلث الكبير هو رقاقة مضخم تحتوي على ترانزستورات (سوف نناقشها في الفصل 29)، إلا أنّ عناصر الدارة الأخرى مألوفة لنا. وسندرس المقاومات والمكثفات في هذا الفصل ضمن الدارات الكهربائية. كما سندرس أيضًا الفولتميتر والأميتر، وكيفية تركيبهما واستعمالهما في عمل القياس.





الفصل 19

دارات DC

تُعدّ الدارات الكهربائية أجزاء أساسية في الأجهزة الإلكترونية جميعها؛ من المذياع والتلفاز، إلى الحاسوب والسيارة. إنّ القياسات العملية بدءًا من الفيزياء إلى الأحياء والطبّ تستعمل فيها دارات كهربائية. لقد درسنا في (الفصل 18) المبادئ الأساسية للتيار الكهربائي. وسنطبق الآن هذه المبادئ في تحليل دارات dc تشتمل على بطاريات، ومقاومات، ومواسعات. وسندرس أيضًا عمل بعض أجهزة القياس المفيدة.*

عندما نرسم مخطّطًا لدارة ما، فإنّ البطاريات والمكثفات والمقاومات تمثل بالرموز الموضحة في (الجدول 19-1). أمّا أسلاك التوصيل التي مقاومتها مهملة مقارنة مع باقي المقاومات التي في الدارة، فتمثل ببساطة بخطوط مستقيمة. توضح بعض المخططات لدارة ما رمز التأريض هكذا (V أو، والذي قد يعني توصيلًا حقيقيًّا مع الأرض، ربّما من خلال أنبوب معدني، أو أنّه يعني ببساطة توصيلًا مشتركًا، مثل هيكل السيارة.

في أغلب هذا الفصل، ما عدا (البند 19-6) الذي يتعلق بدارات RC، سنهتم بالدارات التي تعمل في حالة الاستقرار، أي أنّنا لن ننظر إلى الدارة عند اللحظة التي يحدث فيها تغير، مثل عند وصل أو فصل مقاومة أو بطارية، ولكن بعد زمن قليل عندما تصل التيارات إلى قيمتها الثابتة.

الجدول 19-1 رموز عناصر الدارة

الجهاز	الرمز
بطارية	±
مواسع	⊣⊢ أو ƒ
مقاومة	-ΛΛΛ-
سلك مقاومته مهملة	———
مفتاح	—⁄ —
تأريض	⏚ أو ⏚

19-1 EMF والجهد الطرفي

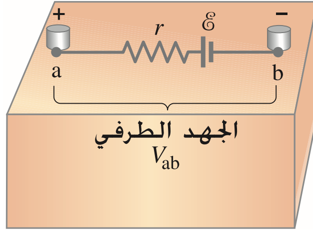
تعريف EMF

إذا أردنا الحصول على تيار في دارة كهربائية؛ فسنحتاج إلى جهاز مثل بطارية أو مولد كهربائي لتحويل أحد أشكال الطاقة (على سبيل المثال الكيماوية، أو الميكانيكية، أو الضوئية) إلى طاقة كهربائية. ولهذا الجهاز **قوة دافعة كهربائية** أو emf (مصطلح **"القوة الدافعة الكهربائية"** وهو اسم مغلوط لأنه لا يشير إلى قوة تقاس بوحدة النيوتن. لذلك حتى لا يحدث التباس، فإننا نفضل استعمال الاختصار emf.) يسمى الفرق في الجهد بين طرفي مثل هذا المصدر، عندما لا يتدفق تيار كهربائي لدارة خارجية- emf لذلك المصدر. وفي العادة، يستعمل الرمز $\mathscr{E}$ للإشارة إلى emf (تجنب الخلط بين هذا الرمز ورمز المجال الكهربائي E) ووحدة قياسه هي الفولت.

* دارات ac والتي تحتوي فقط على مصدر الجهد ومقاومات يمكن تحليلها مثل دارات dc في هذا الفصل، لكن دارات ac التي تحتوي على مكثفات وعناصر اخرى تكون أكثر تعقيدًا، وسوف نناقشها في (الفصل 21) .

تنويه: لماذا لا يكون جهد البطارية ثابتًا تمامًا.

إنّ البطارية ليست مصدرًا لتيار ثابت؛ حيث يختلف التيار الذي يخرج من البطارية حسب المقاومة التي في الدارة. وعلى أيّ حال، نستطيع القول إنّ البطارية مصدر لجهد ثابت تقريبًا، ولكن ليس ثابتًا تمامًا، كما سنرى الآن. ربما لاحظت من خلال تجربتك أنه عندما يُسحب تيار من بطارية، فإنّ فرق الجهد (الفولتية) بين طرفيها يقلّ عن emf المحددة لها. فعلى سبيل المثال، إذا شغلت محرك سيارة، وكانت المصابيح الأمامية مضاءة، فربما لاحظت أنّ هذه المصابيح تكون خافتة. يحدث ذلك لأنّ تشغيل السيارة يسحب تيارًا كبيرًا، ونتيجة لذلك تهبط فولتية البطارية؛ لأنّ التفاعلات الكيميائية في البطارية لا يمكنها تزويد الشحنة بسرعة كافية للحصول على القيمة الكاملة لـِ emf. ويعزى هذا إلى أنّ الشحنة يجب أن تتحرك (خلال المحلول الكهربائي- الكهروليت) بين قطبي البطارية، وهناك دائمًا ممانعة لحدوث تدفق حرّ بشكل تام. لذلك، فإنّ البطارية لها مقاومة تسمى **المقاومة الداخلية**، ويرمز إليها عادة بالرمز r. يمكن تصور البطارية الحقيقية على أنها $\mathscr{E}$ (emf) تامة موصولة على التوالي مع مقاومة r كما في (الشكل1-19). وبما أنّ هذه المقاومة r موجودة داخل البطارية، فلا يمكن أن نفصلها عن البطارية. تمثل النقطتان a، و b في المخطط طرفي البطارية. وما نقوم بقياسه هو **الجهد الطرفي** $V_{ab} = V_a - V_b$. عندما لا يسحب أيّ تيار من البطارية، فإنّ الجهد الطرفي يساوي emf، والتي تحدد بواسطة التفاعلات الكيميائية في البطارية $V_{ab} = \mathscr{E}$. عندما يتدفق تيار I بشكل طبيعي من البطارية، يكون هناك هبوط في الجهد بمقدار يساوي Ir. لذا، فإنّ الجهد الطرفي (الجهد الحقيقي) يساوي*



الشكل 1-19 مخطط لخلية كهربائية أو بطارية

الجهد الطرفي

$$V_{ab} = \mathscr{E} - Ir \quad \textbf{(1-19)}$$

على سبيل المثال، إذا كان لبطارية 12 V مقاومة داخلية Ω 0.1، وتدفق منها تيار شدته 10 A، فإنّ الجهد الطرفي يساوي $12\ \text{V} - (10\text{A})\ (0.1\ \Omega) = 11\ \text{V}$. تكون المقاومة الداخلية للبطارية عادة صغيرة. فبطارية مصباح الجيب المألوفة عندما تكون جديدة، قد تكون لها مقاومة داخلية تصل إلى Ω 0.05. (على أيّ حال، يجف المحلول الكهربائي (الكهروليت) مع مرور الزمن، وتزداد مقاومتها الداخلية إلى عدد من الأوم) إنّ المقاومة الداخلية لبطارية السيارة أقلّ من ذلك.

المثال 19-1 بطارية لها مقاومة داخلية

وصلت مقاومة Ω 65.0 إلى طرفي بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (12.0 V) emf ومقاومتها الداخلية Ω 0.5 (الشكل 19-2). احسب: (أ) التيار الذي يمر في الدارة. (ب) الجهد الطرفي للبطارية V_{ab}. (جـ) القدرة المستنفدة في المقاومة الداخلية r للبطارية.

الشكل 19- 2 (المثال 19- 1)

$R = 65.0\ \Omega$, I, a, b, $r = 0.5\ \Omega$, $\mathscr{E} = 12.0\ \text{V}$

النّهج: نعتبر أولًا البطارية ككل (المبينة في الشكل19-2)، على أنّها emf ($\mathscr{E}$) ومقاومة داخلية r بين النقطتين a، و b. ثم نطبق العلاقة $V = IR$ على الدارة نفسها.

الحلّ: (أ) من (المعادلة 19-1) .

$$V_{ab} = \mathscr{E} - Ir$$

نطبق قانون أوم (المعادلة 18-2) على البطارية والمقاومة R التي للدارة: $V_{ab} = IR$. وعليه، يكون R التي للدارة: $\mathscr{E} = I(R + r)$. و عليه يكون $IR = \mathscr{E} - Ir$
لذا، فإنّ:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r} = \frac{12.0\ \text{V}}{65.0\ \Omega + 0.5\ \Omega} = \frac{12.0\ \text{V}}{65.5\ \Omega} = 0.183\ \text{A}$$

(ب) الجهد الطرفي يساوي

$$V_{ab} = \mathscr{E} - Ir = 12.0\ \text{V} - (0.183\ \text{A})(0.5\ \Omega) = 11.9\ \text{V}$$

(ج) القدرة المستنفدة (المعادلة 18-6) في R تساوي

$$P_R = I^2R = (0.183\ \text{A})^2(65.0\ \Omega) = 2.18\ \text{W}$$

وفي المقاومة r

$$P_r = I^2r = (0.183\ \text{A})^2(0.5\ \Omega) = 0.02\ \text{W}$$

التمرين أ أعد حلّ (المثال 19 - 1) على فرض أنّ المقاومة $R = 10.0\ \Omega$ ، في حين تبقى قيمتا $\mathscr{E}$ و r كالسابق.

*عندما تشحن بطارية، يجبر تيار على المرور خلالها، ولذلك يجب أن نكتب في هذه الحالة

$$V_{ab} = \mathscr{E} + Ir$$

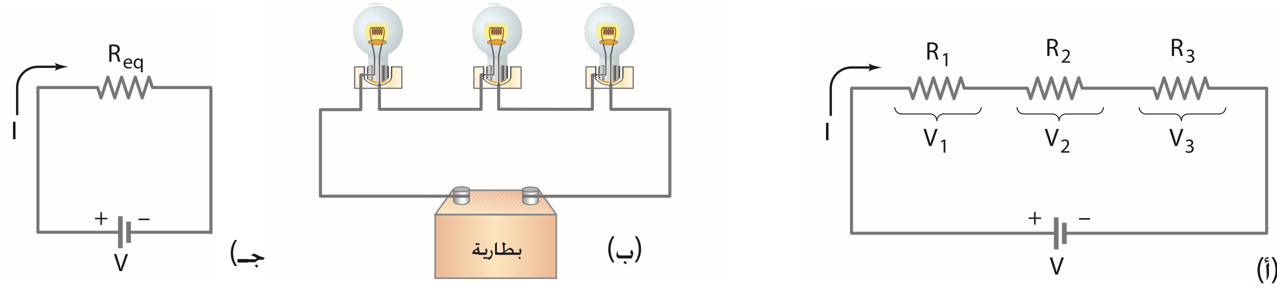
انظر إلى (المثال 19- 9 ، أو المسألة 24، والشكل 19-44).

في كثيرٍ مّا سيأتي لاحقًا- إلا إذا ذكر غير ذلك- سنفترض أنّ المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، وأنّ فولتية البطارية المعطاة هي جهدها الطرفي، والذي سيكتب عادة V بدلًا من V_{ab}. تجنب الخلط بين V (حرف مائل) الذي يمثل الجهد، و V (غير المائل) الذي يشير إلى وحدة الفولت.

2-19 وصل المقاومات على التوالي وعلى التوازي

عند وصل مقاومتين أو أكثر طرفًا بطرف على طول مسار واحد كما في (الشكل 19- 3أ) ، يُقال للمقاومات إنّها موصولة على **التوالي**. يمكن أن تكون المقاومات بسيطة كما هي مصورة في (الشكل 18 - 11) ، أو قد تكون مصابيح كهربائية (19-3 ب)، أو عناصر تسخين، أو أجهزة مقاومة أخرى. أي شحنة تمر من خلال R_1 في (الشكل 19- 3 أ) سوف تمر أيضًا من خلال R_2 ، و R_3. لذلك، فإنّ التيار I نفسه سوف يمر خلال كلّ مقاومة. (إذا لم يكن الوضع كذلك، فإمّا أنّ الشحنة لم تكن محافظة، أو أنّها تتراكم عند نقطةٍ ما في الدارة، وهذا لا يحدث عادة في حالة الاستقرار).

الشكل19-3 (أ) مقاومات موصولة على التوالي (ب) يمكن أن تكون المقاومات مصابيح كهربائية أو أي نوع من المقاومات، مقاومة وحيدة مكافئة R_{eq} تسحب التيار نفسه: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$



نفترض أنّ V يمثل فرق الجهد (الفولتية) بين طرفي المقاومات الثلاث ككل (الشكل-19 3 أ)، كما سنفترض أنّه يمكن إهمال المقاومات الأخرى جميعها في الدارة، لذا، فإنّ V يساوي الجهد الطرفي الذي تزوده البطارية. نفترض أنّ V_1 و V_2 و V_3 تمثل فروق الجهد بين طرفي كلّ من المقاومات R_1، و R_2، و R_3، على الترتيب. من قانون أوم $V= IR$، يمكن كتابة: $V_1 = IR_1$ و $V_2 = IR_2$ و $V_3 = IR_3$. وبما أنّ المقاومات موصولة طرفًا بطرف، فإنّنا سنجد من مبدأ حفظ الطاقة أنّ الجهد الكلي V يساوي مجموع فروق الجهد* بين طرفي كلّ مقاومة:

دارة التوالي: تُجمع الجهود، يمر التيار نفسه في كلّ مقاومة

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 \quad \text{[التوالي] (19- 2)}$$

سنحدد الآن مقاومة وحيدة مكافئة R_{eq} تسحب التيار I نفسه الذي تسحبه المقاومات الثلاث الموصولة على التوالي، انظر (الشكل 19-3 جـ). مثل هذه المقاومة الوحيدة R_{eq} يجب أنّ ترتبط مع V من خلال

$$V = IR_{eq}$$

نساوي الآن بين هذا التعبير و (المعادلة 19-2)، ونجد أنّ

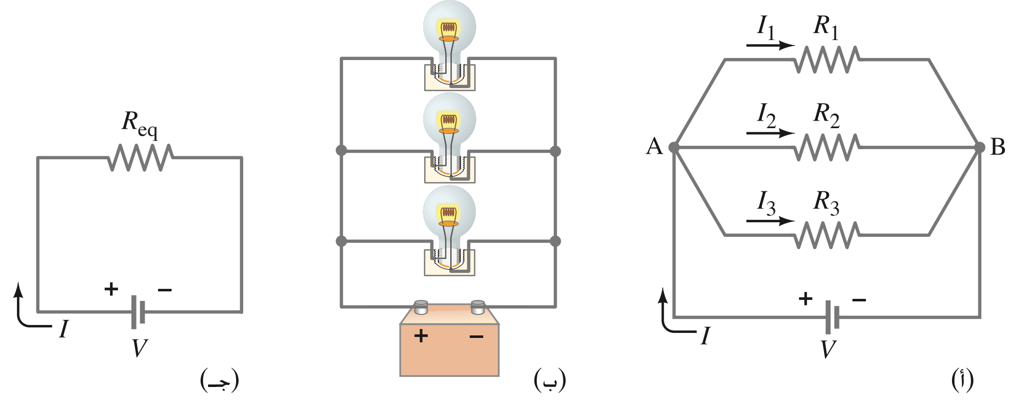
المقاومات على التوالي

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3. \quad \text{[توالي] (19 - 3)}$$

وهذا ما نتوقعه في الحقيقة. عند وصل عدة مقاومات على التوالي، فإنّ المقاومة الكلية أو المكافئة هي مجموع المقاومات منفصلة. (يمكن أحيانًا أن تسمى "المقاومة الكلية".) يطبق هذا المجموع على أيّ عدد من المقاومات الموصولة على التوالي. لاحظ أنه عند إضافة مقاومات أكثر للدارة، فإنّ التيار خلالها سيقلّ. على سبيل المثال، إذا وصلت بطارية 12-V إلى مقاومة 4-Ω ، فإنّ التيار سيكون 3A. ولكن، إذا وصلت البطارية 12-V إلى ثلاث مقاومات قيمة كلّ منها 3-Ω وموصولة على التوالي، فإنّ المقاومة الكلية تساوي 12 Ω. لذا، فإنّ التيار خلال الدارة كاملة سوف يكون 1A فقط.

* لمعرفة سبب صحة ذلك بالتفصيل: لاحظ أنّ الشحنة الكهربائية q تفقد مقدارًا من طاقة الوضع يساوي qV_1. عند مرورها خلال R_2، و R_3، تقل طاقة الوضع PE بالمقدار qV_2، و qV_3، بحيث إنّ المجموع $\Delta PE = qV_1 + qV_2 + qV_3$ يجب أن يساوي الطاقة الكلية qV التي تمنحها البطارية للشحنة q، أي أنَّ الطاقة محفظة. وهكذا، فإنّ $qV = q(V_1 + V_2 + V_3)$. وعليه، فإنّ $V = V_1 + V_2 + V_3$ وهي (المعادلة 19- 2).

وهناك طريقة أخرى بسيطة لوصل المقاومات وهي طريقة **التوازي**؛ وفيها يتجزأ التيار من المصدر إلى الفروع المختلفة أو المسارات، كما هو موضح في (الشكل 19- 4 أ). ترتب التوصيلات الكهربائية في المنازل والبنايات بحيث تكون الأجهزة الكهربائية جميعها موصولة على التوازي، كما أوضحنا ذلك سابقًا في(الفصل 18، الشكل 18- 20) . من خلال التوصيل على التوازي، إذا فصل أحد الأجهزة مثلاً R_1 في (الشكل 19- 4 أ)، فإنّ التيار الذي يمر في الأجهزة الأخرى لا يتأثر. ومقارنة مع دائرة التوالي، إذا فصل أحد الأجهزة مثلا R_1 في (الشكل 19- 3 أ)، فإنّ التيار يتوقف عن المرور في الأجهزة الأخرى كلّها.



الشكل 19- 4

(أ) مقاومات موصولة على التوازي

(ب) يمكن أن تكون المقاومات مصابيح كهربائية.

(جـ) الدارة المكافئة مع المقاومة R_{eq} التي حصلت عليها من (المعادلة 19-4):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

في دارة التوازي، (الشكل 19-4أ)، يغادر التيار الكلي I البطارية، ويتجزأ إلى ثلاثة مسارات مختلفة. دعنا نفترض أنّ I_1، وI_2، و I_3 تمثل التيارات التي تمر خلال كلّ من المقاومات R_1، R_2 و R_3 على الترتيب. وبما أنّ الشحنة الكهربائية محافظة، فإنّ التيار I الذي يتدفق إلى عقدة A حيث تلتقي الأسلاك أو الموصلات المختلفة، (الشكل 19-4 أ) يجب أن يساوي التيار الذي يتدفق خارجًا من العقدة. أي أنّ

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \qquad \text{[توازي]}$$

دارة التوازي: تجمع التيارات، الجهد ثابت بين طرفي كلّ مقاومة من المقاومات.

عند وصل المقامات على التوازي، يتساوي الجهد بين طرفي كلّ مقاومة. (في الواقع، أيّ نقطتين في دارة موصولتين بواسطة سلك مهمل المقاومة يكون لهما الجهد نفسه). لذلك، فإنّ الجهد الذي للبطارية التي في (الشكل 19-4 أ) كلّه يؤثر بين طرفي كلّ مقاومة. وعند تطبيق قانون أوم على كلّ مقاومة، سنجد أنّ

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \text{ ،} \quad I_2 = \frac{V}{R_2} \text{ و } \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

دعنا الآن نحدّد ما هي المقاومة الوحيدة R_{eq} (الشكل 19-4 أ) التي ستسحب التيار I نفسه الذي تسحبه هذه المقاومات الثلاث الموصولة على التوازي. كما يجب على هذه المقاومة المكافئة R_{eq} أن تحقق قانون أوم أيضا:

$$I = \frac{V}{R_{eq}}$$

بتجميع المعادلات أعلاه، نحصل على

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

$$\frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

وعند قسمة كلّ حدّ على V، نجد أنّ

مقاومات على التوازي

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \qquad \text{[توازي] (4-19)}$$

على سبيل المثال، افترض أنك وصلت مكبري صوت مقاومة كلّ منهما Ω 4 - 4 إلى مجموعة واحدة من مخارج مضخم النظام الصوتي أو المستقبل الذي لديك. (اهمل السماعة الأخرى للحظة، افرض مثلاً أنّ مكبري الصوت موصولان مع السماعة اليسرى).

المقاومة المكافئة للمقاومتين Ω 4- الموصولتين على التوازي تساوي

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{4\,\Omega} + \frac{1}{4\,\Omega} = \frac{2}{4\,\Omega} = \frac{1}{2\,\Omega}$$

وهكذا، فإنّ $R_{eg} = 2\Omega$. وعليه، فإنّ المقاومة الكلية (أو المكافئة) أقلّ من أيٍّ من المقاومتين. في البداية قد يبدو ذلك مدهشًا، لكن تذكّر أنّه عند وصل المقاومات على التوازي، فإنّك *تمنح* التيار مسارات إضافية يتدفق من خلالها. لذلك فإنّ المقاومة المكافئة سوف تكون أقلّ. قد يكون التناظر مفيدًا هنا. افترض أنبوبين متماثلين يدخل منهما الماء بالقرب من أعلى سدّ ويخرج منهما عند أسفله كما في (الشكل 19-5). يتناسب الفرق في طاقة الوضع الناتج من الجاذبية مع الارتفاع h، وهو نفسه لكلا الأنبوبين، تمامًا كما أنّ الجهد يكون نفسه للمقاومات الموصولة على التوازي. إذا فتح كلا الأنبوبين، يتدفق من خلالهما ضعف كمية الماء. أي أنّه بوجود أنبوبين متساويين ومفتوحين، فإنّ المقاومة الكلية لتدفق الماء سوف تقلّ إلى النصف، *تمامًا* كما في المقاومات الكهربائية الموصولة على التوازي. لاحظ أنه إذا أغلق كلا الأنبوبين، فإنّ السد يبدي مقاومة لا نهائية لتدفق الماء. وهذا يقابل في الحالة الكهربائية دارة مفتوحة عندما لا يكون المسار مغلقًا ولا يسري تيار. لذا، تكون المقاومة الكهربائية لا نهائية.



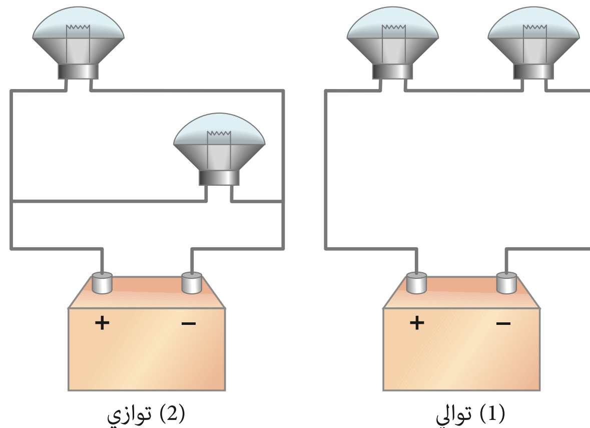
الشكل 19-5 أنبوبا ماء على التوازي- يناظران التيارات الكهربائية في حالة التوازي

المثال المفاهيمي 19-2 التوالي أو التوازي

(أ) المصابيح الكهربائية التي في (الشكل 19-6)متماثلة ومقاومتها R أيضًا متماثلة. أيّ من الترتيبين يُصدر ضوءًا أكثر؟ (ب) أيّ طريقة تعتقد أنها تستخدم في توصيل الأضواء الأمامية في السيارة؟

الإجابة (أ) يتم إيجاد المقاومة المكافئة في دارة التوازي من خلال (المعادلة 19- 4)، $1/R_{\text{eq}} = 1/R + 1/R = 2/R$. لذا، فإنّ $R_{\text{eq}} = R/2$. ولهذا، فإنّ ترتيب التوازي مقاومته $(= R/2)$ أقلّ من تلك التي لترتيب التوالي $(R_{\text{eq}} = R + R = 2R)$. وعليه، يكون التيار الكلي في حالة التوازي (2) أكثر منه في حالة التوالي؛ لأنّ $I = V/R_{\text{eq}}$ والجهد V متساوٍ في كلتا الدارتين. إنّ القدرة الكلية المستنفدة التي ترتبط مع الضوء الناتج تساوي $P = IV$. لذا، فإنّ التيار الأكبر في (2) يعني أنّ الضوء الناتج أكثر.

(ب) توصل الأضواء الأمامية على التوازي (2)، لأنّه إذا احترق فتيل أحدهما، فإنّ الآخر يبقى مضاء. فإذا كانا موصولين على التوالي (1)، فإنّه عند احتراق فتيل أحدهما (ينقطع الفتيل) تصبح الدارة مفتوحة ولا يتدفق التيار، ولذلك لن يضيء المصباح الآخر (الذي لم يحترق فتيله).

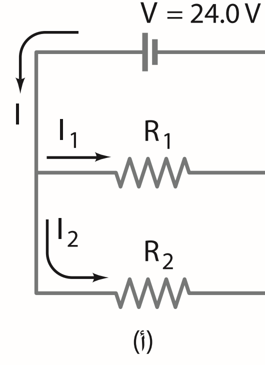


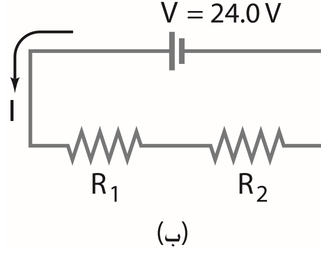
الشكل 19-6 (المثال 19-2)

المثال 19-3 مقاومات على التوالي والتوازي

مقاومتان؛ كلٌّ منهما Ω 100 موصولتان (أ) على التوازي. (ب) على التوالي إلى بطارية V 24.0. انظر إلى (الشكل 19-7). ما التيار الذي يمر خلال كلّ مقاومة؟ وما المقاومة المكافئة لكلّ دارة؟

النّهج: نستعمل قانون أوم، وكذلك الأفكار التي ناقشناها الآن بالنسبة إلى التوصيل على التوالي والتوازي للحصول على التيار في كلّ حالة. كما يمكننا استعمال (المعادلتين 19-3، و 19-4) أيضًا.





الشكل 19-7 (المثال 19-3)

الحلّ: (أ) أيّ شحنة معطاة (أو إلكترون) يمكن أن تتدفق خلال مقاومة واحدة فقط، أو خلال مقاومة أو الأخرى من المقاومتين في (الشكل 19-7أ) المقاومة الأخرى للمقاومتين في (الشكل 19-7أ). تمامًا كما يتجزأ النهر عندما يمر حول جزيرة. وهنا أيضًا، يتجزأ التيار الكلي I الذي يخرج من البطارية (الشكل 19-7 أ) ليتدفق خلال كلّ مقاومة. لذا، فإنّ I يساوي مجموع التيارين المنفصلين اللذين يمران خلال المقاومتين.

$$I = I_1 + I_2$$

V=24.0 V فرق الجهد بين طرفي كلّ مقاومة يساوي جهد البطارية

وبتطبيق قانون أوم على كلّ مقاومة، سنجد أنّ

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \frac{24.0\ \text{V}}{100\ \Omega} + \frac{24.0\ \text{V}}{100\ \Omega}$$
$$= 0.24\ \text{A} + 0.24\ \text{A} = 0.48\ \text{A}$$

المقاومة المكافئة تساوي

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24.0\ \text{V}}{0.48\ \text{A}} = 50\ \Omega$$

ويمكننا أيضًا الحصول على هذه النتيجة من (المعادلة 19-4)

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{100\Omega} + \frac{1}{100\Omega} + \frac{2}{100\Omega} = \frac{1}{50\Omega}$$

وعليه، فإنّ $R_{eq}=50\Omega$

(ب) إنّ التيار الذي يتدفق خارجًا من البطارية كلّه يمرّ أولًا من خلال R_1 ثم من خلال R_2؛ لأنّهما يقعان على المسار نفسه. (الشكل 19-7 ب) يمرّ التيار I نفسه خلال المقاومتين؛ فرق الجهد V بين طرفي البطارية يساوي مجموع التغير في الجهد بين طرفي كلّ مقاومة من المقاومتين:

$$V = V_1 + V_2$$

ويعطينا قانون أوم

$$V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

لذلك

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{24.0\text{V}}{100\Omega + 100\Omega} = 0.120\text{A}$$

وباستعمال (المعادلة 19-3)، نجد أنّ المقاومة المكافئة تساوي $R_{eq} = R_1 + R_2 = 200\ \Omega$. ويمكننا أيضًا الحصول على المقاومة المكافئة بالتفكير من وجهة نظر البطارية؛ يجب أن تساوي المقاومةُ الكليةُ R_{eq} جهدَ البطارية مقسومًا على التيار الذي تزود به الدارة كما يلي:

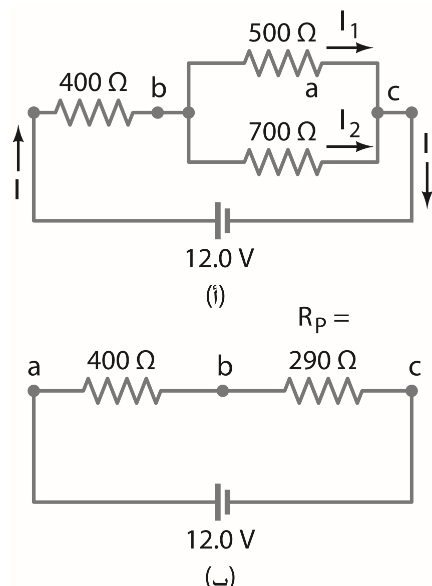
$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24.0\text{V}}{0.120\text{V}} = 200\Omega$$

ملحوظة: إنّ الجهد بين طرفي R_1 يساوي $V_1 = IR_1 = (0.120\ \text{A})(100\ \Omega) = 12.0\ \text{V}$. أمّا الجهد الذي بين طرفي R_2 فيساوي $V_2 = IR_2 = 12.0\ \text{V}$ ويمثل كلّ منهما نصف جهد البطارية. تُسَمّى الدارة البسيطة، مثل تلك التي في (الشكل 19-7 ب)، عادة **مجزيء جهد** بسيط.

مجزيء الجهد

التمرين ب: صمّم مُجزِّيء جهد يمكنه جعل الجهد بين طرفي R_2 خُمُسَ جهد البطارية. ما نسبة R_1/R_2؟

لاحظ أنّه عند استعمال المقاومة المكافئة بدلًا من مجموعة مقاومات ، فإنّ التيار، والجهد، والقدرة في بقية أجزاء الدارة لا تتأثر .



الشكل 19-8 (أ) دارة (للمثالين 19-4، و19-5)
(ب) تبين الدارة المكافئة أنّ المقاومة المكافئة للمقاومتين الموصلتين على التوازي في (أ) تساوي 290 أوم.

المثال 19-4 دارة توالٍ وتوازٍ

كم شدة التيار الذي يسحب من البطارية المبينة في (الشكل 19-8 أ)؟

النّهج: التيار I الذي يتدفق خارجًا من البطارية يمرّ خلال المقاومة $400\ \Omega$. ولكنّه يتجزأ إلى I_1، و I_2 وهما يمرّان خلال المقاومتين $500\ \Omega$، و $700\ \Omega$. وهاتان المقاومتان موصولتان مع بعضهما على التوازي. ومن أجل التبسيط؛ نبحث عن شيء ما نعرف كيفية التعامل معه مسبقًا. لذا، دعنا نبدأ بإيجاد المقاومة المكافئة R_p للمقاومتين الموصولتين على التوازي $500\ \Omega$،
و $700\ \Omega$. ثم افتراض أنّ هذه المقاومة R_P موصولة على التوالي مع المقاومة $400\ \Omega$.

الحلّ: المقاومة المكافئة R_P للمقاومتين $500\ \Omega$، و $700\ \Omega$ الموصولتين على التوازي تعطى بالعلاقة

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{500\ \Omega} + \frac{1}{700\ \Omega} = 0.0020\ \Omega^{-1} + 0.0014\ \Omega^{-1} = 0.0034\ \Omega^{-1}$$

وهذه هي المقاومة $1/R_P$. لذا، نأخذ المقلوب لإيجاد R_P. والخطأ الشائع هو عدم أخذ هذا المقلوب. لاحظ أنّ الوحدة لمقلوب الأوم هي تذكير لكي تأخذ المقلوب. لذلك فإنّ

$$R_P = \frac{1}{0.0034\ \Omega^{-1}} = 290\ \Omega$$

وهذه $290\ \Omega$ هي المقاومة المكافئة للمقاومتين الموصولتين على التوازي. وهي موصولة على التوالي مع المقاومة $400\ \Omega$ كما هو مبين في الدارة المكافئة الكلية R_{eq}. نجمع المقاومتين $290\ \Omega$ و $400\ \Omega$ مع بعضهما. لأنّهما موصولتان على التوالي. ونجد

$$R_{eq} = 400\ \Omega + 290\ \Omega = 690\ \Omega$$

لذا، فإنّ التيار الكلي I الذي يتدفق من البطارية يساوي

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{12.0\ \text{V}}{690\ \Omega} = 0.0174\ \text{A} \approx 17\ \text{mA}$$

ملحوظة: يمرّ هذا التيار I أيضًا في المقاومة $400\ \Omega$. ولكنّه لا يمرّ خلال المقاومتين $500\ \Omega$ و$700\ \Omega$(كلا التيارين أقلّ. انظر إلى المثال التالي).

ملحوظة: يمكن تحليل الدارات المركبة التي تشتمل على مقاومات بهذه الطريقة أيضًا. على اعتبار أنّ الدارة مجموعة من المقاومات الموصولة على التوالي والتوازي.

تنويه:
تذكر أن تأخذ المقلوب

المثال 19-5 التيار في فرع واحد

ما شدّةُ التيّارِ الذي يمرُّ خلال المقاومة $500\ \Omega$ في (الشكل 19-8) (أ)؟

النّهج: نحتاج إلى إيجاد الجهد بين طرفي المقاومة $500\ \Omega$، والذي يساوي الجهد بين النقطتين b و c في (الشكل 19-8 أ)، ويشار إليه بالرمز V_{bc}. حالما يكون V_{bc} معلومًا، نطبق قانون أوم $V = IR$ لنحصل على التيار. سنجد أولاً الجهد بين طرفي المقاومة $400\ \Omega$، V_{ab} لأنّنا نعلم مسبقًا أنّ تيارًا شدته 17 mA يمرّ خلالها.

الحلّ: يمكن إيجاد V_{ab} باستعمال $V = IR$.

$$V_{ab} = (0.0174\ \text{A})(400\ \Omega) = 7.0\ \text{V}$$

بما أنّ الجهد الكلي بين طرفي شبكة المقاومات هو $V_{ac} = 12.0\ \text{V}$، فإنّ V_{bc} يجب أن يساوي $12.0\ \text{V} - 7.0\ \text{V} = 5.0\ \text{V}$ ثم نطبق قانون أوم على المقاومة $500\text{-}\Omega$ لنجد أنّ التيار I_1 الذي يمر خلالها يساوي

$$I_1 = \frac{5.0\ \text{V}}{500\ \Omega} = 1.0 \times 10^{-2}\ \text{A} = 10\ \text{mA}$$

وهذا هو الجواب الذي نريده. يمكننا أيضًا حساب التيار I_2 الذي يمر خلال المقاومة $700\ \Omega$ لأنّ الجهد بين طرفيها هو أيضًا $5.0\ \text{V}$

$$I_2 = \frac{5.0\ \text{V}}{700\ \Omega} = 7\ \text{mA}$$

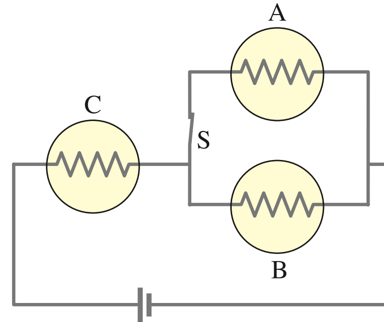
ملحوظة: عندما يجتمع I_1 مع I_2 يتشكل التيار الكلي I (عند النقطة c في الشكل 19-8أ). ومجموعهما يساوي $10\ \text{mA} + 7\ \text{mA} = 17\ \text{mA}$. وهذا بالطبع هو التيار الكلي I كما تم حسابه في (المثال 19-4) .

المثال المفاهيمي 19-6 شدة إضاءة مصباح كهربائي في دارة

تحتوي الدارة المبينة في (الشكل 19-9)على ثلاثة مصابيح متماثلة مقاومة كلّ منها R. (أ) عندما يغلق المفتاح s، كيف تكون شدة إضاءة المصباحين A، و B مقارنة مع شدة إضاءة المصباح C؟ (ب) ماذا يحدث عند فتح المفتاح s؟ استعمل الحد الأدنى للخطوات الرياضية في إجاباتك.

الإجابة: (أ) مع إغلاق المفتاح s، فإنّ التيار الذي يمر خلال المصباح C يجب أن يتجزأ إلى قسمين متساويين عندما يصل إلى العقدة التي تؤدي إلى المصباحين A، و B. يتجزأ التيار إلى قسمين متساويين؛ لأنّ مقاومة المصباح A تساوي تلك التي للمصباح B، لذلك، فإنّ كلا منهما يمر خلاله نصف التيار الذي يمر خلال المصباح C. وعليه، فإنّ إضاءة A، و B تكون متساوية، ولكنهما أقلّ إضاءة من المصباح C.

(ب) عندما يكون المفتاح s مفتوحًا، لا يمر أيّ تيار خلال المصباح A، وبالتالي فإنه يكون معتمًا. وعليه، سيكون لدينا الآن دارة توالٍ بسيطة مكونة من حلقة واحدة، ونتوقع أن تكون إضاءة المصباحين B، و C متساوية. ومع ذلك، تكون المقاومة المكافئة لهذه الدارة ($=R+R$) أكبر من تلك التي للدارة عندما يكون المفتاح مغلقًا. وعندما تكون الدارة مفتوحة بفعل المفتاح، فإننا نزيد من مقاومتها، فيقلّ التيار الذي يغادر البطارية. لذلك، يكون المصباح C خافتًا عندما يفتح مفتاح الدارة. ويحصل المصباح B على تيار أكبر عندما يفتح مفتاح الدارة (ربما نحتاج هنا إلى استخدام بعض العمليات الحسابية)، وبالتالي يكون أكثر إضاءة منه عندما يكون المفتاح مغلقًا، كما أنّ إضاءته تكون مثل تلك التي للمصباح C .



الشكل 19-9 (المثال 19-6) ثلاثة مصابيح كهربائية متماثلة، كلّ دائرة صفراء تحتوي بداخلها على -ᐱᐱᐱ- تمثل مصباحا ومقاومته

مثال إضافي

المثال 19-7 تحليل دارة

بطارية 9.0 V مقاومتها الداخلية r تساوي 0.50 Ω، موصولة في الدارة المبينة في (الشكل 19-10 أ).
(أ) كم شدة التيار الذي يسحب من البطارية؟ (ب) ما الجهد الطرفي للبطارية؟ (جـ) ما شدة التيار الذي يمر خلال المقاومة 6.0 Ω؟

النّهج: لإيجاد التيار الذي يخرج من البطارية، نحتاج أولًا إلى تحديد المقاومة المكافئة R_{eq} للدارة كلّها، بما فيها r، والذي يتم من خلال تحديد مجموعة بسيطة من المقاومات الموصولة على التوالي أو التوازي وعزلها. حالما يتمّ إيجاد I من خلال قانون أوم $I = \mathscr{E}/R_{eq}$، يمكننا إيجاد الجهد الطرفي باستعمال $V_{ab} = \mathscr{E} - Ir$. للفرع (جـ) نطبق قانون أوم على المقاومة 6.0 Ω.

الحل: (أ) نريد تحديد المقاومة المكافئة للدارة. ولكن من أين نبدأ؟ نلاحظ أنّ المقاومتين 4.0 Ω، و 8.0 Ω موصولتان على التوازي. لذا، فإنّ المقاومة المكافئة R_{eq1} تعطى بـ

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{1}{8.0\,\Omega} + \frac{1}{4.0\,\Omega} = \frac{3}{8.0\,\Omega};$$

وعليه، فإنّ $R_{eq1} = 2.7\,\Omega$. هذه المقاومة 2.7 Ω موصولة على التوالي مع المقاومة 6.0 Ω كما هو مبين في الدارة المكافئة في (الشكل19-10 ب) . المقاومة المكافئة للذراع السفلية للدارة تساوي

$$R_{eq2} = 6.0\,\Omega + 2.7\,\Omega = 8.7\,\Omega$$

كما هو مبين في (الشكل 19-10 جـ) . المقاومة المكافئة R_{eq3} للمقاومتين 8.7 Ω، و 10.0 Ω الموصولتين على التوازي تعطى بـ

$$\frac{1}{R_{eq3}} = \frac{1}{10.0\,\Omega} + \frac{1}{8.7\,\Omega} = 0.21\,\Omega^{-1}$$

إذن، $R_{eq3} = (1/0.21\,\Omega^{-1}) = 4.8\,\Omega$. هذه المقاومة 4.8 Ω موصولة على التوالي مع المقاومةΩ 5.0، ومع المقاومة الداخلية للبطارية (الشكل 19- 10 د) لذلك، فإنّ المقاومة المكافئة الكلية للدارة R_{eq} تساوي $R_{eq} = 4.8\,\Omega + 5.0\,\Omega + 0.50\,\Omega = 10.3\,\Omega$. ولهذا، فإنّ التيار الذي يسحب من البطارية يساوي

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\mathscr{E}}} = \frac{9.0V}{10.3\Omega} = 0.87A$$

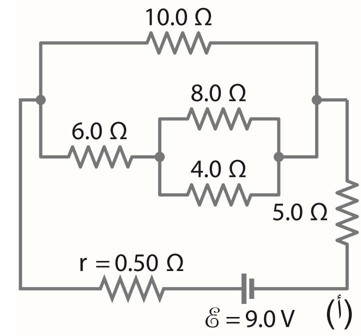
(ب) الجهد الطرفي للبطارية يساوي

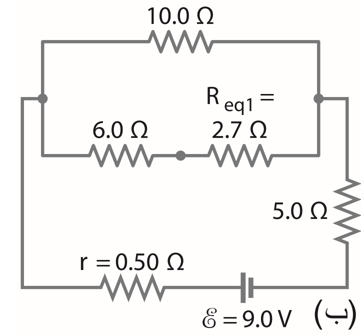
$$V_{ab} = \mathscr{E} - Ir = 9.0\text{ V} - (0.87\text{ A})(0.50\,\Omega) = 8.6\text{ V}.$$

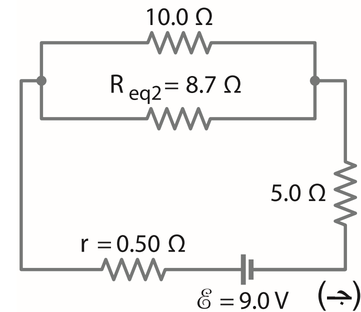
(جـ) يمكننا القيام بخطوات عكسية للحصول على التيار في المقاومة 6.0 Ω، والذي يجب أن يكون القيمة نفسها للتيار الذي يمر خلال المقاومة 8.7 Ω الموضحة في (الشكل 19-10 جـ) (لماذا؟) الجهد بين طرفي المقاومة 8.7 Ω يساوي emf للبطارية ناقصًا الهبوط في الجهد بين طرفي r والمقاومة 5.0 Ω: $V_{8.7} = 9.0V - (0.87A)(0.50\,\Omega + 5.0\,\Omega)$. وبتطبيق قانون أوم، نحصل على التيار (ليكن I)

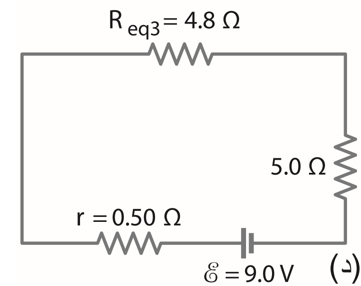
$$I = \frac{9.0V - (0.87A)(0.50\,\Omega + 5.0\,\Omega)}{8.7\Omega} = 0.48A$$

هذا هو التيار الذي يمر خلال المقاومة 6.0- Ω.









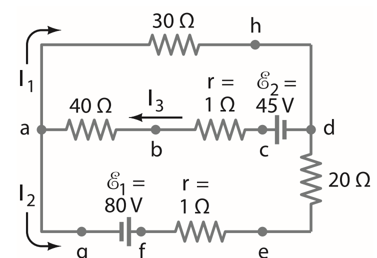
الشكل 19-10 دارة (للمثال 19-7)، حيث r هي المقاومة الداخلية للبطارية.

19-3 قاعدتا كيرشوف

في الأمثلة القليلة السابقة، تمكنا من إيجاد التيارات في الدارات بواسطة تجميع المقاومات الموصولة على التوالي والتوازي، وباستعمال قانون أوم. ويمكن استعمال هذه الطريقة للعديد من الدارات. ومع ذلك، فإنّ بعض الدارات معقدة كثيرًا بالنسبة لمثل هذا التحليل. على سبيل المثال، لا يمكننا إيجاد التيارات في كلّ جزء من أجزاء الدارة الموضحة في (الشكل 19-11) ببساطة من خلال تجميع المقاومات كما قمنا بذلك سابقًا.

وللتعامل مع مثل هذه الدارات المعقدة: نستعمل قاعدتي كيرشوف (1824-1887) اللتين ابتكرهما في منتصف القرن التاسع عشر.

الشكل 11-19 يمكن حساب التيارات باستعمال قاعدتي كيرشوف.



هناك قاعدتان، وهما ببساطة تطبيقات سهلة لقانوني حفظ الشحنة والطاقة. تستند قاعدة **كيرشوف الأولى** أو **قاعدة العقدة** إلى حفظ الشحنة الكهربائية. وقد استخدمت سابقًا في اشتقاق قاعدة توصيل المقاومات على التوازي، وهي تنصّ على ما يلي:

قاعدة العقدة (حفظ الشحنة)

"عند أيّ عقدة، يجب أن يساوي مجموعُ التيارات الداخلة إلى العقدة مجموعَ التيارات الخارجة منها ".

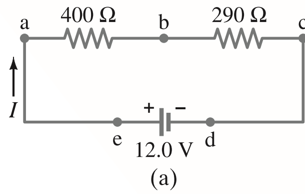
أي أنّه، مهما يدخل من شحنة يجب أن يخرج. على سبيل المثال، عند نقطة العقدة a في (الشكل 19-11)، يدخل التيار I_3، في حين يخرج كلّ من I_1، و I_2. لذلك، تنصّ قاعدة كيرشوف للعقدة على أنّ $I_3 = I_1 + I_2$. وقد رأينا سابقًا مثالًا على ذلك من خلال الملحوظة التي في نهاية (المثال 19-5) .

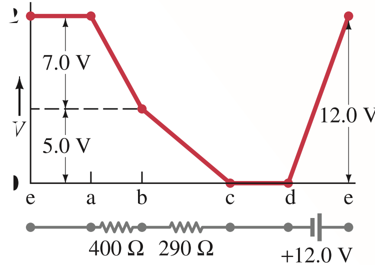
أمّا قاعدة **كيرشوف الثانية** أو **قاعدة العروة**، فتستند إلى حفظ الطاقة. وتنصّ على أنّ

قاعدة العروة (حفظ الطاقة)

"مجموع التغيرات في الجهد حول أي مسار مغلق في دارة يجب أن يساوي صفرًا"

لمعرفة سبب وجوب تحقّق هذه القاعدة؛ افترض التناظر التقريبي بين طاقة الوضع لعربات صغيرة تتحرك على مسارها في مدينة ترويحية. عندما تبدأ العربات بالتحرك من محطة الانطلاق، يكون لها طاقة وضع معينة. وعندما تصعد التلة الأولى، تزداد طاقة وضعها، وتصل إلى الحد الأقصى عند القمة. وعندما تهبط من الجهة الأخرى، تقل طاقة وضعها إلى الحدّ الأدنى عند أسفل التلة. وكلّما استمرت العربات بالحركة على مسارها، تحدث تغيرات أكثر في طاقة وضعها. ولكن عندما تعود إلى نقطة البداية، فإنّ طاقة وضعها تكون مساوية تمامًا لتلك التي كانت لها عندما بدأت الحركة من هذه النقطة. وهناك طريقة أخرى للتعبير عن ذلك، وهي إنه يوجد ارتفاع بمقدار الانخفاض.





الشكل 19-12 التغيرات في الجهد حول الدارة في (أ) ترسم بيانيًا في (ب).

ويمكن أن يطبق هذا التفكير نفسه على دارة كهربائية. سنقوم بتحليل الدارة التي في (الشكل 19-11) حالًا. ولكن دعنا أولا نعتبر الدارة البسيطة التي في (الشكل 19-12) . وقد اخترناها لتكون الدارة المكافئة نفسها التي في (الشكل 19-8 ب) والتي نوقشت سابقًا. يساوي التيار في هذه الدارة $I = (12.0\ \text{V})/(690\ \Omega) = 0.0174\ \text{A}$، كما تم حسابه في (المثال 19-4) . (لقد احتفظنا بمنزلة إضافية في I؛ لتقليل أخطاء التدوير). الطرف الموجب للبطارية، النقطة e في (الشكل 19-12 أ)، ذات جهد مرتفع مقارنة مع النقطة d التي عند الطرف السالب للبطارية. أي أنّ النقطة e مثل قمة التلة بالنسبة إلى العربات. نتتبع التيار حول الدارة بالبدء من عند أيّ نقطة.

لقد اخترنا البدء من النقطة e وتتبع حركة شحنة اختبار موجبة حول الدارة كاملة. عندما نتحرك، نسجل التغيرات كلها في الجهد. وعندما تعود شحنة الاختبار إلى النقطة e، يكون لها الجهد نفسه الذي بدأت به (التغير الكلي في الجهد حول الدارة يساوي صفرًا). ثم نرسم بيانيًّا التغيرات في الجهد حول الدارة كما في(الشكل 19-12 ب)؛ اختيرت النقطة d ليكون الجهد عندها صفرًا.

عندما تتحرك الشحنة الاختبارية من النقطة e إلى النقطة a لا يتغير الجهد؛ بسبب عدم وجود مصدر لـ emf. وقد افترضنا أنّ مقاومة أسلاك التوصيل مهملة. وعندما تمر الشحنة خلال المقاومة 400 لتصل إلى النقطة b، يقلّ الجهد بالمقدار $V = IR = (0.0174\ \text{A})(400\ \Omega) = 7.0\ \text{V}$. تتدفق شحنة الاختبار الموجبة بانحدار؛ لأنّها تتجه نحو الطرف السالب للبطارية، كما أشرنا إلى ذلك في الرسم البياني (للشكل 19-12 ب) . وبما أنّ هذا يمثل انخفاضًا في الجهد، فإننا نستعمل إشارة سالب.

$$V_{ba} = V_b - V_a = -7.0\ \text{V}.$$

وعندما تتابع الشحنة حركتها من b إلى c، يكون هناك انخفاض آخر في الجهد (هبوط في الجهد) يساوي $(0.0174\ \text{A}) \times (290\ \Omega) = 5.0\ \text{V}$ وهذا انخفاض في الجهد أيضًا. إذن

$$V_{cb} = -5.0\ \text{V}.$$

لا يوجد تغير في الجهد عندما تتحرك شحنة الاختبار من c إلى d؛ لأنّنا افترضنا أنّ مقاومة الأسلاك مهملة. ولكن عندما تتحرك من d، والتي هي الطرف السالب أو الجهد المنخفض للبطارية، إلى النقطة e التي هي الطرف الموجب (طرف الجهد المرتفع) للبطارية، فإنّ الجهد يزداد بـ 12.0 V، أي أنّ

$$V_{ed} = +12.0\ \text{V}$$

مجموع التغيرات كلها في الجهد حول الدارة التي في (الشكل 19-12) يساوي

$$-7.0\ \text{V} - 5.0\ \text{V} + 12.0\ \text{V} = 0$$

وهذا بالضبط ما تنصّ عليه قاعدة العروة لكيرشوف.

توجيه لحلّ الأسئلة.

التزم بالاشارات عند تطبيق قاعدة العروة.

طريقة حلّ المسائل قاعدتا كيرشوف

1. سمِّ التيار في كلّ فرع منفصل للدارة المعطاة. واستعمل رموزا سفليا. مثل I_1، I_2، I_3 (انظر الشكل 19-11 أو 19-13). يشير كلّ تيار إلى قطعة بين عقدتين. اختر اتجاه كلّ تيار باستعمال سهم. ويمكن اختيار اتجاه التيار عشوائيًا؛ إذا كان التيار الحقيقي في الاتجاه المعاكس، فإنه يظهر في ناتج الحلّ مع إشارة سالبة.

2. حدّد المجاهيل. تحتاج إلى عدد من المعادلات المستقلة مساوٍ لعدد المجاهيل. يمكنك كتابة معادلات أكثر من هذا العدد، ولكن ستجد أنّ بعض هذه المعادلات زائد عن الحاجة (أي أنها ليست مستقلة لأنّها لا تعطي معلومات جديدة). يمكن أن تستعمل $V = IR$ لكلّ مقاومة، لأنّه يقلّل في بعض الأحيان عدد المجاهيل.

3. طبّق قاعدة كيرشوف للعقدة عند عقدة أو أكثر.

4. طبّق قاعدة كيرشوف للعروة على عروة واحدة أو أكثر: تتبع كلّ عروة في اتجاه واحد فقط مع الاهتمام بالرموز السفلية والإشارات.

(أ) للمقاومة؛ طبق قانون أوم: يكون فرق الجهد سالبًا (يتناقص) إذا كان اتجاه العروة التي اخترتها هو اتجاه التيار نفسه الذي اخترته ليمر خلال المقاومة. ويكون فرق الجهد موجبًا (يزداد) إذا كان اتجاه العروة التي اخترتها معاكسًا لاتجاه التيار.

(ب) للبطارية، يكون فرق الجهد موجبًا إذا كان اتجاه العروة من الطرف السالب نحو الطرف الموجب، في حين يكون فرق الجهد سالبًا إذا كان اتجاه العروة من الطرف الموجب نحو الطرف السالب.

5. حلّ المعادلات جبريًا بالنسبة إلى المجاهيل. كن حذرًا عند حلّ المعادلات حتى لا تخطئ في الإشارات. وفي النهاية، تأكد من إجاباتك وذلك بتعويضها في المعادلات الأصلية، أو حتى باستعمال معادلات إضافية لقاعدة العقدة أو العروة التي لم تستعمل سابقًا.

المثال 19-8 استخدام قاعدتي كيرشوف

احسب التيارات I_1، I_2، وI_3 في الفروع الثلاثة للدارة التي في (الشكل 19-13) .

النّهج والحلّ:

1. سمِّ التيارات وحدّد اتجاهاتها. تستخدم في (الشكل 19-13) الرموز I_1، I_2، وI_3 للتيار في الفروع الثلاثة المنفصلة. وبما أنّ التيار (الموجب) يحاول الانتقال بعيدًا عن الطرف الموجب للبطارية، فإننا نختار I_2، و I_3 لتكون في الاتجاهات المبينة في (الشكل 19-13) . ولأنّ اتجاه I_1 غير واضح مقدمًا، فإننا سنختاره عشوائيًا ليكون في الاتجاه المبين. إذا كان التيار الحقيقي يتدفق في الاتجاه المعاكس، فإنّ الإجابة سالبة.

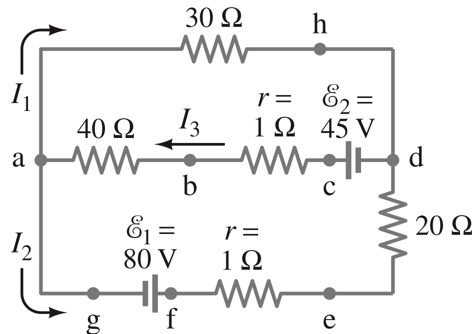
2.حدد المجاهيل. لدينا ثلاثة مجاهيل، ولذلك نحتاج إلى ثلاث معادلات، نحصل عليها من خلال تطبيق قاعدتي كيرشوف للعقدة والعروة.

3. قاعدة العقدة: نطبق قاعدة كيرشوف للعقدة على التيارات عند النقطة a، حيث I_3 يدخل إلى العقدة، أما I_2، و I_1 فيغادراها.

$$I_3=I_1+I_2 \quad \text{(أ)}$$

وتتحقق هذه المعادلة أيضًا عند النقطة d، لذلك، نحصل الآن على معلومات جديدة من خلال كتابة معادلة للنقطة d.

توجيه لحلّ المسائل.
اختر اتجاهات التيار كما تريد



الشكل 19-13 يمكن حساب التيارات باستخدام قاعدتي كيرشوف. انظر إلى (المثال 19-8)

4. قاعدة العروة: نطبّق قاعدة كيرشوف للعروة على عروتين مغلقتين ومختلفتين. نطبّقها أولا على العروة العلوية ahdcba. نبدأ (وننتهي) عند النقطة a. فمن a إلى h يقلّ الجهد) $V_{ha} = -(I_1)(30\,\Omega)$. ومن h إلى d لا يوجد تغير في الجهد. ولكن من d إلى c يزداد الجهد بمقدار 45 V؛ أي أنّ $V_{cd} = +45$ V. من c إلى a يقلّ الجهد خلال المقاومتين بالمقدار $V_{ac} = -(I_3)(40\,\Omega + 1\,\Omega) = -(41\,\Omega)I_3$. لذلك، يكون لدينا

$$V_{ha} + V_{cd} + V_{ac} = 0 \text{ أو } -30I_1 + 45 - 41I_3 = 0 \qquad \text{(ب)}$$

حيث تم حذف وحدات القياس. وللعروة الثانية، نأخذ العروة الخارجية ahdefga. (يمكن أن نختار بدلا منها العروة السفلية abcdefga). وهنا، نبدأ مرة أخرى من النقطة a، فيكون لدينا $V_{ha} = -(I_1)(30\,\Omega)$ و $V_{dh} = 0$. ولكن عندما تنتقل شحنة اختبار موجبة من d إلى e، فإنها تصعد في الحقيقة إلى أعلى التلة، عكس التيار، أو على الأقلّ عكس اتجاه التيار الافتراضي، وهو الذي يؤخذ بالحسبان في هذه الحسابات. لذا، فإنّ إشارة $V_{ed} = I_2(20\,\Omega)$ موجبة. وبطريقة مماثلة $V_{fe} = I_2(1\,\Omega)$ ويقلّ الجهد من f إلى g بمقدار 80 V لأنّنا ننتقل من طرف الجهد المرتفع للبطارية إلى الطرف المنخفض. لذلك، فإنّ $V_{gf} = -80$ V . أخيرًا $V_{ag} = 0$ ويكون مجموع التغيرات في الجهد حول هذه العروة

$$0 = 80 - I_2\,(20+1) + I_1 \cdot 30 \qquad \text{(جـ)}$$

5. **حل المعادلات.** لدينا ثلاث معادلات (أ)، و(ب)، و(جـ) وثلاثة مجاهيل. ونجد من المعادلة (جـ) أن

$$I_2 = \frac{80 + 30I_1}{21} = 3.8 + 1.4I_1 \qquad \text{(د)}$$

ومن المعادلة (ب) نحصل على

$$I_3 = \frac{45 - 30I_1}{41} = 1.1 - 0.73I_1 \qquad \text{(هـ)}$$

ونعوض المعادلتين (د) و (هـ) في (أ)

$$I_1 = I_3 - I_2 = 1.1 - 0.73I_1 - 3.8 - 1.4I_1$$

بتجميع الحدود وحلّ المعادلة بالنسبة إلى I_1

$$3.1I_1 = -2.7$$

$$I_1 = -0.87 \text{ A}$$

تشير إشارة السالب إلى أنّ اتجاه I_1 هو في الحقيقة عكس اتجاه التيار الذي افترض في بداية الحلّ المبين في (الشكل 19-13) . لاحظ أنّ الجواب جاء تلقائيًا بوحدة الأمبير؛ لأنّ القيم جميعها كانت بوحدات الفولت والأوم. من المعادلة (د)

$$I_2 = 3.8 + 1.4I_1 = 3.8 + 1.4(-0.87) = 2.6 \text{ A}$$

ومن المعادلة (هـ)

$$I_3 = 1.1 - 0.73I_1 = 1.1 - 0.73(-0.87) = 1.7 \text{ A}$$

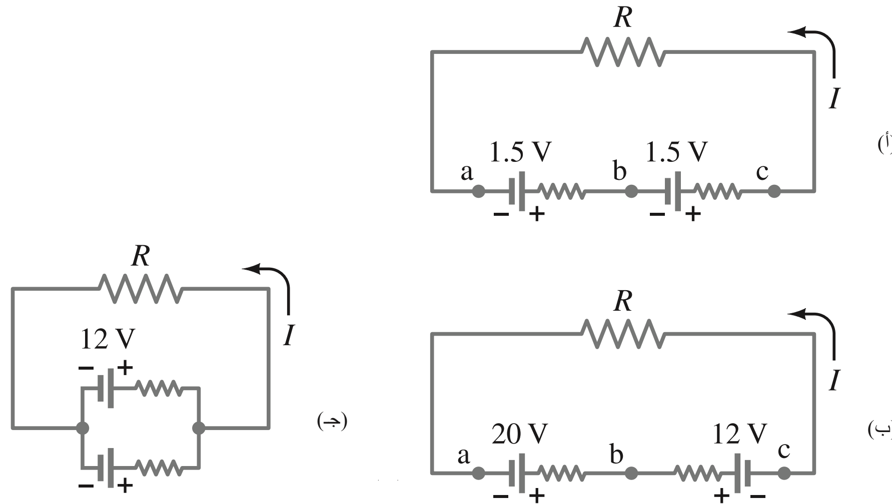
وهذا يكمل الحلّ.

ملحوظة: ليس من الضروري أن تكون المجاهيل في الحالات المختلفة هي التيارات. فقد تكون التيارات معلومة، ونقوم بالحلّ بالنسبة إلى مقاومة غير معلومة أو بالنسبة إلى الجهد.

التمرين جـ: اكتب المعادلة للعروة السفلية abcdefga في (المثال 19-8) وبين، على فرض أنّ التيارات معلومة في هذا المثال، أنّ الجهود تجمع إلى الصفر لهذه العروة السفلية.

* 4-19 وصل مصادر EMF على التوالي والتوازي شحن بطارية

عند وصل مصدرين أو أكثر من مصادر emf، مثل بطاريات، على التوالي كما في (الشكل 19-14 أ)، فإنّ الجهد الكلي يساوي المجموع الجبري لجهود هذه المصادر. من جهة أخرى، وعند وصل بطاريتين إحداهما 20 V والأخرى 12 V بشكل معاكس، كما في (الشكل 19-14 ب)، فإنّ الجهد الكلي V_{ca} يساوي 8 V (أهمل الهبوط في الجهد بين أطراف المقاومات الداخلية)، أي أنّ شحنة الاختبار التي تنتقل من a إلى b تكتسب جهدًا بمقدار 20 V، ولكن عندما تمر من b إلى c، فإنها تفقد جهدًا بمقدار 12 V، وعليه، فإنّ التغير الكلي يساوي 20 V - 12 V = 8 V. قد تعتقد أنّ توصيل البطاريات بشكل معاكس كما سبق سيكون نوعًا من الهدر والإسراف، وهذا صحيح في أغلب الحالات. ولكن مثل هذا الترتيب المعاكس يبين بالضبط كيفية عمل بطارية الشحن. في (الشكل 19-14 ب) يقوم المصدر 20 V بشحن البطارية 12 V. ولأنّ الجهد بين طرفي المصدر 20V أكبر، فإنّه يجبر الشحنة كي تعود إلى البطارية 12V؛ تجبر الإلكترونات على الحركة نحو طرفها السالب وتنتزع من طرفها الموجب.



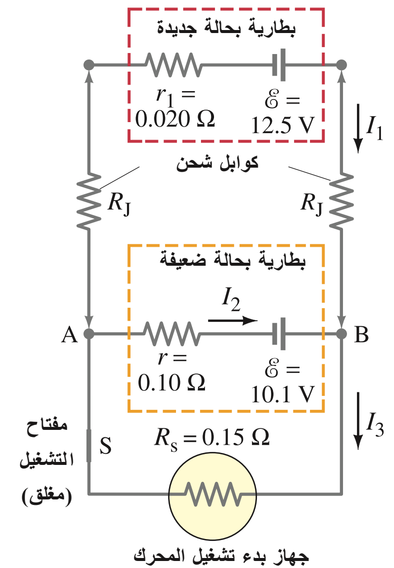
الشكل 19-14 بطاريات موصولة على التوالي (أ) و (ب)، وموصولة على التوازي (جـ).

يعمل المولد في السيارة على شحن البطارية بالطريقة نفسها. إذا وضع فولتميتر بين طرفي بطارية (12 V) سيارة في أثناء دوران المحرك بسرعة كافية، فإنّه قد يبين فيما إذا كان المولّد يشحن البطارية أم لا.

فإذا كان يقوم بشحنها، فإنّ قراءة الفولتميتر تكون 13 V أو 14V. أمّا إذا لم تشحن البطارية، فإنّ قراءة الفولتميتر تكون 12 V أو أقلّ إذا كانت البطارية تقوم بالتفريغ. يمكن إعادة شحن بطاريات السيارة، ولكن بعض البطاريات الأخرى لا يمكن إعادة شحنها لأنّ التفاعلات الكيميائية في العديد منها لا يمكن أن تنعكس. في مثل هذه الحالات، فإنّ التوصيل كما في (الشكل 19-14 ب) يكون –ببساطة- هدرًا للطاقة.

يمكن أيضًا توصيل مصادر الـ emf على التوازي كما في (الشكل 19-14 جـ)، وهذا التوصيل مفيد فقط إذا كانت الـــ emf لهذه المصادر متساوية، لا يستخدم التوصيل على التوازي لزيادة الفولتية، بل لتزويد طاقة أكبر عندما تكون هناك حاجة إلى تيارات شدتها كبيرة، إنّ كل خلية من الخلايا الموصولة على التوازي تنتج جزءًا فقط من التيار الكلي، لذلك، فإنّ الطاقة المفقودة بسبب المقاومة الداخلية تكون أقلّ بالنسبة إلى الخلية الواحدة، وينتهي عمر التشغيل للبطاريات ببطء.

الشكل 19-15 (المثال 19-9) تشغيل سيارة بالشحن



المثال 19-9 تشغيل سيارة بالشحن

بطارية سيارة حالتها جيدة، تستعمل لتشغيل سيارة بطاريتها ضعيفة عن طريق الشحن. البطارية الجيدة قوتها الدافعة الكهربائية (12.5 V) emf ومقاومتها الداخلية 0.020 Ω. افرض أنّ البطارية الضعيفة قوتها الدافعة الكهربائية (10.1 V) emf ومقاومتها الداخلية 0.10 Ω. كلّ كيبل من الكوابل النحاسية المستخدمة في الشحن طوله 3.0 m وقطره 0.50 cm ويمكن وصله كما في (الشكل 19 - 15) . افرض أنّ جهاز بدء تشغيل المحرك يمكن أن يُمثل بمقاومة $R_s = 0.15\ \Omega$. جد التيار خلال هذا الجهاز إذا وصلت معه البطارية (أ) الضعيفة فقط. (ب) البطارية الجيدة أيضًا ، كما هو موضح في (الشكل 19-15) .

النّهج: نطبق قاعدتي كيرشوف، ولكن في (أ) نحتاج أولا إلى تحديد مقاومة كوابل الشحن مستعملا أبعادها المعطاة والمقاومية (للنحاس $\rho = 1.68 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$) كما بينا في (البند 18-4) .

الحل: (أ) بوجود بطارية ضعيفة ودون وجود كوابل الشحن. تكون الدارة بسيطة؛ عبارة عن قوة دافعة كهربائية (emf = 10.1 V) موصولة مع مقاومتي توالٍ، $0.10\ \Omega\ \ +0.15\ \Omega\ =0.25\ \Omega$.
لذلك، فإنّ التيار يساوي $I = V/R = (10.1\ \text{V})/(0.25\ \Omega) = 40\ \text{A}$.
(ب) نحتاج إلى إيجاد مقاومة كوابل الشحن الموصولة مع البطارية الجيدة. ومن (المعادلة 18- 3) فإنّ كلّ كيبل له مقاومة

$$R_J = \rho L/A\ \ = (1.68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m})(3.0\ \text{m})/(\pi)(0.25 \times 10^{-2}\ \text{m})^2\ = 0.0026\ \Omega$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للعروة على العروة الخارجية كاملة، نجد أنّ

$$12.5\ \text{V} - I_1(2R_J + r_1) - I_3 R_S = 0$$
$$12.5\ \text{V} - I_1(0.025\ \Omega) - I_3(0.15\ \Omega) = 0 \qquad \text{(أ)}$$

لأنّ

$$(2R_J + r) = (0.0052\ \Omega + 0.020\ \Omega) = 0.025\ \Omega$$

وتعطي قاعدة العروة عند تطبيقها على العروة السفلية، بما فيها البطارية الضعيفة وجهاز بدء تشغيل المحرك، ما يلي:

$$10.1\ \text{V} - I_3(0.15\ \Omega) - I_2(0.10\ \Omega) = 0 \qquad \text{(ب)}$$

وبتطبيق قاعدة العقدة عند النقطة B، نجد أنّ

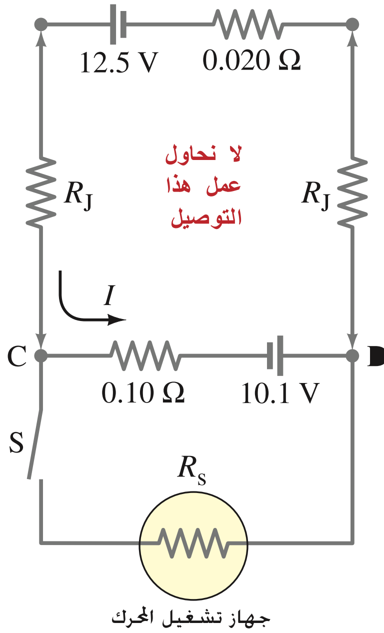
$$I_1 + I_2 = I_3 \qquad \text{(جـ)}$$

لدينا ثلاث معادلات بثلاثة مجاهيل. من (المعادلة جـ) $I_1 = I_3 - I_2$ وبتعويض ذلك في (المعادلة أ):

$$12.5\ \text{V}-(I_3-I_2)\ (0.025\Omega\ )-I_3(0.15\Omega\ )=0$$
$$12.5\ \text{V} - I_3(0.175\ \Omega) + I_2(0.025\ \Omega) = 0$$

وبتجميع هذه المعادلة مع (ب)، نحصل على $I_3 = 71\ \text{A}$، أفضل قليلا منه في (أ). التيارات الأخرى $I_2 = -5\text{A}$ و $I_1 = 76\text{A}$. لاحظ أنّ $I_2 =$ -5 A وهو في الاتجاه المعاكس لذاك الذي افترض في (الشكل 19-15) . إنّ الجهد الطرفي للبطارية (10.1 V) الضعيفة يساوي $V_{BA} = 10.1\ \text{V} - (-5\ \text{A})(0.10\ \Omega) = 10.6\ \text{V}$

ملحوظة: تبين الدارة التي في (الشكل 19-15) ، دون جهاز بدء تشغيل المحرك، كيفية شحن بطارية؛ فالبطارية ذات الفولتية الأكبر تدفع الشحنة لتعود إلى البطارية الضعيفة.



الشكل 19-16 (التمرين د)

تمرين د: إذا وصلت كوابل الشحن في (المثال 19-9) بالخطأ بطريقة عكسية، فإنّ الطرف الموجب لكلّ بطارية يكون موصولاً مع الطرف السالب للبطارية الأخرى (الشكل 19-16). ماذا يكون التيار I حتى قبل توصيل جهاز بدء تشغيل المحرك (المفتاح s في الشكل 19-16 غير مغلق)؟ لماذا يمكن أن يسبب ذلك انفجار البطاريات؟

5-19 دارات تحتوي على مواسعات موصولة على التوالي والتوازي

تمامًا كما يمكن توصيل المقاومات على التوالي أو على التوازي في دارة، يمكن كذلك توصيل المكثفات (الفصل 17). دعنا نبدأ أولاً بالتوصيل على **التوازي** كما هو مبين في (الشكل 19-17) . فإذا كان فرق الجهد V الذي تزوده البطارية للنقطتين a و b، فإنّ فرق الجهد هذا نفسه $V = V_{ab}$ يوجد أيضًا بين طرفي كلّ مواسع. أي أنّه، بما أنّ الألواح التي على الجهة اليسرى للمواسعات كلّها موصولة بواسطة موصلات، فإنّها تصل إلى الجهد V_a نفسه عند توصيلها مع البطارية، والألواح التي على الجهة اليمنى تصل إلى الجهد V_b. وكلّ لوح يكتسب شحنة تعطى بـ $Q_1 = C_1 V$ و $Q_2 = C_2 V$ و $Q_3 = C_3 V$. وتساوي الشحنة الكلية التي يجب أن تغادر البطارية

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

دعنا نحاول إيجاد مواسع مكافئ وحيد يحمل الشحنة Q نفسها عند الجهد $V = V_{ab}$ ذاته. سوف تكون مواسعته C_{eq}، وتعطى بـ

$$Q = C_{eq} V$$

وبتجميع المعادلتين السابقتين، سنحصل على

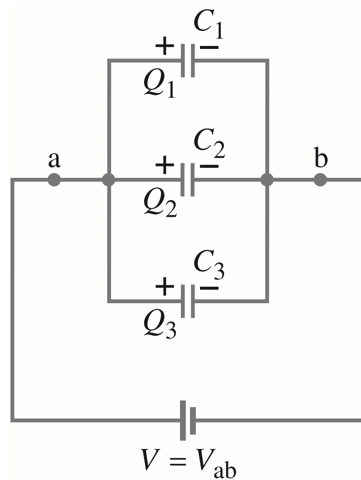
$$C_{eq} V = C_1 V + C_2 V + C_3 V = (C_1 + C_2 + C_3)V$$

أو

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \qquad \text{[توازي] (5 - 19)}$$

إنّ التأثير الكلي لتوصيل المكثفات على التوازي هو زيادة المكثفة. وهذا معقول؛ لأنّنا نقوم أساسًا بزيادة مساحة الألواح حيث تتراكم الشحنة (على سبيل المثال، انظر إلى المعادلة 17-8)

الشكل 19-17 مواسعات موصولة على التوازي: $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$



مواسعات موصولة على التوازي.

يمكن أيضًا توصيل المكثفات على **التوالي**، أي طرفا بطرف كما هو مبين في (الشكل 19-18) . تتدفق الشحنة $+Q$ من البطارية إلى أحد لوحي C_1، في حين تتدفّق الشحنة $-Q$ إلى أحد لوحي C_3. أما الحيزان A، و B بين المكثفات فهما متعادلان في الأصل. لذا، فإنّ الشحنة الكلية هناك يجب أن تبقى صفرًا. تجذب الشحنة $+$ التي على اللوح الأيسر للمواسع C_1 شحنة $-Q$ من على اللوح المقابل. وبما أنّ الشحنة الكلية للحيز A يجب أن تكون صفرًا، فإنّ هناك شحنة $+Q$ على اللوح الأيسر للمواسع C_2. ويمكن تطبيق هذا على المكثفات الأخرى بالطريقة نفسها. لذلك، نلاحظ أنّ الشحنة على كلّ لوح كلّ مواسع لها المقدار Q نفسه. المكثف الوحيد الذي يمكن أن يستبدل هذه المكثفات الثلاثة دون أن يؤثر في الدارة (أي أنّ Q، و V يبقيان كما هما) يجب أن تكون مواسعته C_{eq}، حيث

$$Q = C_{eq}V$$

ويجب أن يساوي الجهدُ الكلي V بين طرفي المكثفات الثلاثة الموصولة على التوالي مجموعَ الجهود بين طرفي كلّ مواسع كما يلي:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

لدينا أيضًا لكلّ مواسع $Q=C_1V_1$، و $Q=C_2V_2$، و $Q=C_3V_3$. وبالتعويض بالنسبة لـ V، و V_1، و V_2، و V_3 في المعادلة الأخيرة، نحصل على

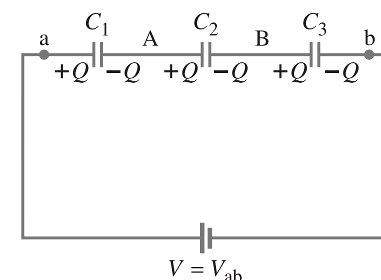
$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)$$

أو

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad \text{[توالي]} \quad \textbf{(6-19)}$$

لاحظ أنّ المكثفة المكافئة C_{eq} أصغر من أصغر مواسع للمواسعات الموصولة على التولي. لاحظ كذلك أنّ معادلتي توصيل المكثفات على كلٍّ من التوالي والتوازي هما عكس نظيرتيهما بالنسبة إلى المقاومات؛ أي أنّ الصيغة التي للمواسعات الموصولة على التوالي تشبه الصيغة التي للمقاومات الموصولة على التوازي.

الشحنة لكلّ مواسع موصول على التوالي هي نفسها.



الشكل 19-18 مواسعات موصولة على التوالي

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

المكثفات الموصولة على التوالي (تجمع كمقلوب)

تنويه:

تشبه صيغةُ المكثفات الموصولة على التوالي صيغةَ المقاومات الموصوله على التوازي.

المثال 19-10 المكثفة (السعة) المكافئة

حدد سعة المكثف الوحيد الذي سيكون له التأثير نفسه لمجموعة المكثفات المبينة في (الشكل 19-19أ). افترض أنّ $C_1 = C_2 = C_3 = C$

النّهج: نجد أولًا السعة المكافئة للمواسعين C_2، و C_3 الموصولين على التوازي. ثمّ نفترض أنّ هذه السعة موصولة على التوالي مع المكثف C_1.

الحلّ: المكثفان C_2، و C_3 موصولان على التوازي. لذا، فهما يكافئان مواسعًا وحيدًا سعته:

$$C_{23} = C_2 + C_3 = 2C$$

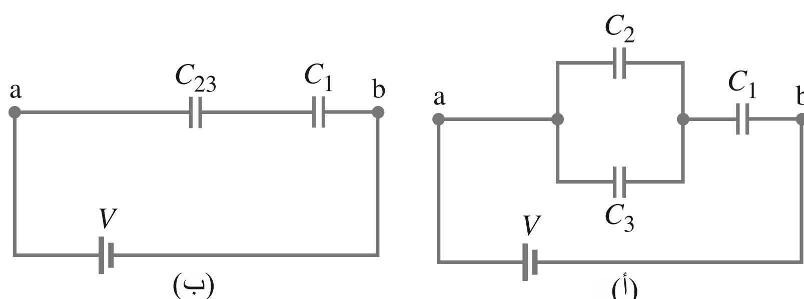
هذا المكثف موصول على التوالي مع C_1، (الشكل 19-19ب). لذا، فإنّ السعة المكافئة للدارة كلّها تعطى بـ:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{2C} = \frac{3}{2C}$$

أي أنّ السعة المكافئة للمجموعة كلّها هي $C_{eq} = \frac{2}{3}C$، وهي أصغر من سعة أيٍّ من المكثفات الموجودة في الدارة $C_1 = C_2 = C_3 = C$.

توجيه لحلّ الأسئلة.

تذكر أن تأخذ المقلوب



الشكل 19-19
(المثالان 19-10، و 19-11)

* مثال إضافي- حساب الشحنة والجهد

المثال 11-19 **الشحنة على مواسع وفرق الجهد بين طرفيه**

حدد الشحنة على كلّ مواسع في (الشكل 19-19أ) للمثال 19-10)، وفرق الجهد بين طرفي كلّ منها.

افرض أنّ $C = 3.0\,\mu F$ وفولتية البطارية $V=4.0$ V.

النّهج: سنقوم بحلّ المثال بخطوات عكسية من خلال (المثال 19-10) . أي إيجاد الشحنة Q التي تغادر البطارية باستعمال السعة المكافئة. ثم نجد الشحنة التي على كلّ مواسع، وفرق الجهد بين طرفي كلّ منها. استعمل في كلّ خطوة (المعادلة 17-7) . $Q=CV$.

الحلّ: فكر في البطارية 4.0 V على أنها موصولة مع السعة C_{eq}، حيث

$$C_{eq} = \frac{2}{3}C = \frac{2}{3}(3.0\mu\ F) = 2.0\mu\ F$$

لذا، فإنّ الشحنة Q التي تغادر هذه البطارية- من (المعادلة 17-7) -تساوي

$$Q = CV = (2.0\,\mu F)(4.0\,V) = 8.0\,\mu C$$

ومن (الشكل 19-19أ)، تصل هذه الشحنة إلى اللوح السالب للمواسع C_1، وعليه، فإنّ $Q_1=8.0\,\mu C$

ولهذا، فإنّ الشحنة Q التي تغادر اللوح الموجب سوف تتجزأ بالتساوي بين C_2، و C_3 (تماثل: $C_3 = C_2$)

وتساوي $Q_2 = Q_3 = \frac{1}{2}Q = 4.0\,\mu C$. كما أنّ فرق الجهد بين طرفي C_2

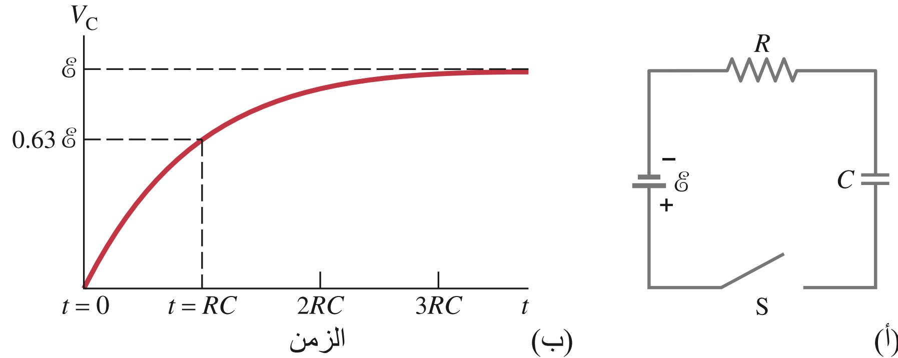
و C_3 يجب أن يكون متساويًا، ويتم الحصول على فرق الجهد بين طرفي كلّ مواسع باستخدام العلاقة $V=Q/C$، لذلك نجد أنّ

$$V_1 = Q_1/C_1 = (8.0\,\mu C)/(3.0\,\mu F) = 2.7\,V$$
$$V_2 = Q_2/C_2 = (4.0\,\mu C)/(3.0\,\mu F) = 1.3\,V$$
$$V_3 = Q_3/C_3 = (4.0\,\mu C)/(3.0\,\mu F) = 1.3\,V$$

6-19 دارات RC- وصل مقاومة ومواسع على التوالي

دارات RC

في أغلب الأحيان توجد المقاومات والمكثفات مع بعضها في الدارة الكهربائية. مثل **دارات *RC*** التي تستعمل للتحكم في ماسحات زجاج السيارة، وتوقيت إشارات المرور، كما أنها تستعمل أيضًا في وميض آلة التصوير، وفي جهاز تنظيم نبضات القلب، وفي الكثير من الأجهزة الإلكترونية الأخرى أيضًا. في دارات *RC*، لا نهتم في حالة الاستقرار النهائية للجهد والشحنة التي على المكثف، ولكن ينصب اهتمامنا على كيفية تغير هذه المتغيرات مع الزمن. يوضح (الشكل 19-20أ) مثالاً بسيطًا لدارة *RC*. وسنقوم الآن بتحليل هذه الدارة.



الشكل 20-19 لدارة RC الموضحة في (أ)، يزداد فرق الجهد بين طرفي المكثف مع الزمن، كما هو موضح في (ب)، وذلك بعد أن يغلق المفتاح s.

شحن المكثف

عندما يغلق المفتاح S، يبدأ التيار في الحال بالتدفق خلال الدارة. تتدفق الإلكترونات من الطرف السالب للبطارية، خلال المقاومة R، وتتجمع على اللوح العلوي للمواسع. وتتدفق الإلكترونات كذلك إلى الطرف الموجب للبطارية، وتترك اللوح الآخر للمواسع موجب الشحنة. كلما تراكمت الشحنة على المكثف يزداد فرق الجهد ($V=Q/C$) بين طرفيه، ويقل التيار حتى يصبح فرق الجهد بين طرفيه مساويًا للقوة الدافعة الكهربائية ℰ للبطارية أخيرا. وعندها، لا يوجد أيّ فرق جهد بين طرفي المقاومة، ولا يتدفق أيّ تيار في الدارة. ومع مرور الزمن، يزداد فرق الجهد بين طرفي المكثف، وهو يتناسب طرديًا مع الشحنة التي على المكثف ($V_C=Q/C$)، معادلة (17-7)، كما في (الشكل 19-20ب). إنّ الشكل الحقيقي لهذا المنحى هو من النوع الأسّيّ، ويعطى بالصيغة * التالية:

$$V_C = \mathcal{E}(1 - e^{-t/RC})$$

تنويه: لا تخلط بين e الأسية و e شحنة الالكترون

حيث استخدمنا الرمز السفلي c ليذكرنا بأنّ V_C هو فرق الجهد بين طرفي المكثف، والذي يعطى هنا كدالة في الزمن t.[يُعرّف الثابت e على أنه الأساس للوغاريتم الطبيعي، وقيمته ...e=2.718 لاتخلط بين هذا الرمز وذاك الذي لشحنة الإلكترون e.]

* يستخدم حساب التفاضل والتكامل في الاشتقاق

يمكن أيضًا كتابة صيغةٍ مماثلةٍ للشحنة $Q\,(=CV_C)$ التي على المكثف

$$Q = Q_0(1 - e^{-t/RC}),$$

حيث تمثّل Q_0 القيمة القصوى للشحنة.

يُسَمّى حاصلُ ضرب المقاومة R في المكثفة C، الذي يظهر في الأسّ **ثابتَ الزمن** τ للدارة.

ثابت الزمن τ=RC

$$\tau = RC \qquad (7\text{-}19)$$

إنّ ثابت الزمن هو مقياس للسرعة التي يصبح خلالها المكثف مشحونًا. [وحدة قياس RC هي $\Omega\cdot F = (V/A)(C/V) = C/(C/s) = s$] ويمكن - بشكل محدد- إثبات أنّ حاصل الضرب RC يعطي الزمن اللازم حتى يصل فرق الجهد بين طرفي المكثف (أو الشحنة التي عليه) إلى 63%، من القيمة القصوى. ويمكن اختبار* ذلك باستخدام أيّ آلة حاسبة تشتمل على مفتاح e^x: $e^{-1}=0.37$. لذلك، عندما $t = RC$، سنجد أن $(1 - e^{-t/RC}) = (1 - e^{-1}) = (1 - 0.37) = 0.63$. على سبيل المثال في الدارة التي تكون فيها $R=200k\ \Omega$ و $C=3.0\mu F$، نجد أنّ ثابت الزمن يساوي $(2.0\times10^5\Omega)(3.0\times10^{-6}F) = 0.60s$ فإذا كانت المقاومة أصغر بكثير، فإنّ ثابت الزمن يكون أيضًا أصغر بكثير. وعليه، فإنّ المكثف يشحن بشكل لحظي تقريبًا. وهذا منطقي؛ لأنّ المقاومة الصغيرة تبدي ممانعة قليلة لتدفق الشحنة. تحتوي الدارات جميعها على بعض المقاومة (حتى ولو كانت في أسلاك التوصيل فقط). لذا، لا يمكن أبدًا شحن المكثف بشكل لحظي عند وصله مع بطارية.

تفريغ المكثف

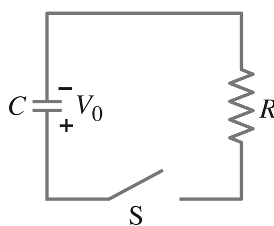
تشتمل الدارة التي درستها الآن على شحن مواسع بواسطة بطارية ومن خلال مقاومة. دعنا الآن ننظر إلى الحالة الأخرى الآتية: مواسع مشحون مسبقًا (مثلاً شحنته Q_0، وفرق الجهد بين طرفيه V_0)، سُمح له بالتفريغ خلال مقاومة R كما هو مبين في (الشكل 19-21أ). (في هذه الحالة لا توجد بطارية في الدارة) عندما يغلق المفتاح s، تبدأ الشحنة بالتدفق من أحد لوحي المكثف خلال المقاومة R باتجاه اللوح الآخر، حتى يفرغ المكثف تمامًا. يقل فرق الجهد بين طرفي المكثف، كما هو مبين في (الشكل 21-19 ب). ويعطى منحنى الانحلال الأسّيّ هذا بالعلاقة الآتية:

$$V_C = V_0 e^{-t/RC}$$

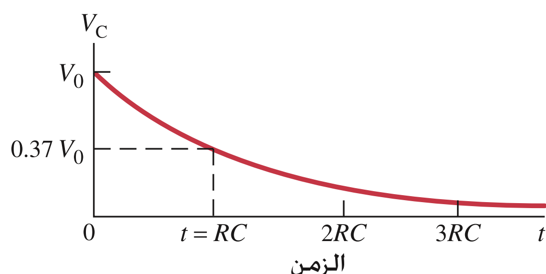
حيث V_0 فرق الجهد الابتدائي بين طرفي المكثف. يهبط الجهد بمقدار 63% في طريقه إلى الصفر (إلى $0.37V_0$) في زمن مقداره $\tau = RC$. بما أنّ الشحنة Q على المكثف تساوي $Q=CV$، لذلك، يمكن كتابة ما يلي:

$$Q = Q_0 e^{-t/RC}$$

بالنسبة إلى تفريغ المكثف، حيث تمثل Q_0 الشحنة الابتدائية على المكثف.



(أ)



(ب)

الشكل 21-19 بالنسبة إلى دارة RC الموضحة في (أ)، يقل فرق الجهد V_C بين طرفي المكثف مع مرور الزمن، كما هو مبين في (ب) بعد أن يغلق المفتاح. الشحنة التي على المكثف تتبع المنحنى نفسه؛ لأنّ $Q \propto V$.

المثال 12-19 **تفريغ دارة RC.**

إذا وصل مواسع مشحون سعته $C = 35\,\mu F$ إلى مقاومة $R = 120\,\Omega$ ، كما في (الشكل 21-19أ). فكم الوقت اللازم لهبوط الجهد إلى 10% من قيمته الأصلية (القصوى)؟

النّهج: يقلّ الجهد بين طرفي المكثف حسب العلاقة $V_C = V_0 e^{-t/RC}$.

نضع $(10\%V_o)$ $V_c = 0.10V_o$. و لكن نحتاج أولاً إلى حساب $\tau = RC$

* ببساطة أكثر، بما أنّ $e = 2.718$، فإنّ $e^{-1} = 1/e = 1/2.718 = 0.37$. لاحظ أنّ e هي العملية العكسية للوغاريتم الطبيعي $\ln(e) = 1,\ \text{and}\ \ln(e^x) = x$

الحلّ: يعطى ثابت الزمن لهذه الدارة كما يلي:

$$\tau = RC = (120\,\Omega)(35 \times 10^{-6}\,\text{F}) = 4.2 \times 10^{-3}\,\text{s}$$

بعد مرور الزمن t، فإنّ فرق الجهد بين طرفي المكثف سيكون

$$V_C = V_0(e^{-t/RC})$$

والآن، علينا معرفة الزمن الذي يصبح عنده $V_C = 0.10V_0$. بتعويض ذلك في المعادلة أعلاه، نجد أنّ

$$0.10V_0 = V_0 e^{-t/RC}$$

وعليه، فإنّ

$$e^{-t/RC} = 0.10$$

العملية العكسية للأسّ e هي اللوغاريتم الطبيعي ln. لذلك، فإنّ

$$\ln(e^{-t/RC}) = -\frac{t}{RC} = \ln 0.10 = -2.3$$

وبحلّ المعادلة بالنسبة إلى t، نجد الزمن الذي سينقضي

$$t = 2.3(RC) = (2.3)(4.2 \times 10^{-3}\,\text{s}) = 9.7 \times 10^{-3}\,\text{s}$$

أو $9.7\ \text{ms}$.

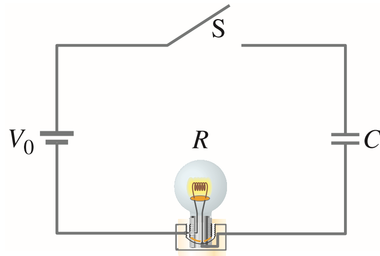
ملحوظة: يمكن إيجاد الزمن لأيّ فرق جهد محدد بين طرفي المكثف باستعمال العلاقة $t = RC\ \ln(V_0/V_C)$.

تمرين هـ: إذا استخدم المكثف $35\text{-}\mu\text{F}$ نفسه الذي في (مثال 19-12). ما قيمة المقاومة R التي تحدث هبوطًا في الجهد يساوي V_0 10% خلال ثانية واحدة؟

المثال المفاهيمي 19-13 مصباح كهربائي في دارة RC

في دارة RC الموضحة في (الشكل 19-22). المكثف غير مشحون أصلا. صف سلوك المصباح منذ لحظة إغلاق المفتاح s وحتى فترة زمنية طويلة لاحقة.

الإجابة: عندما يغلق المفتاح أولاً، تكون شدة التيار في الدارة كبيرة ويضيء المصباح. وكلّما زادت الشحنة على المكثف يزداد فرق الجهد بين طرفيه، ويقل التيار في الدارة مما يتسبب في خفوت ضوء المصباح. وعندما يقترب فرق الجهد بين طرفي المكثف من ذاك الذي للبطارية، يقلّ التيار مقتربًا من الصفر. وأخيرًا، يُطفأ المصباح.



الشكل 19-22 (المثال 19-13)

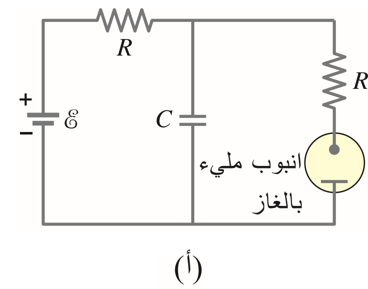
* التطبيقات الطبية والأخرى لدارات RC

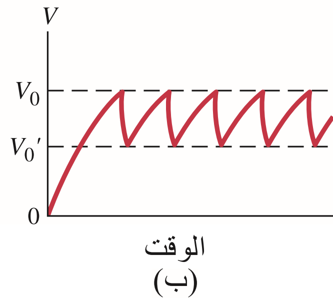
يمكن استخدام شحن دارات RC وتفريغها في توليد ذبذبات فولتية ذات تردد منتظم. تزداد الشحنة على المكثف حتى تصل الفولتية إلى قيمة معينة، ثم تفرغ شحنة المكثف. هناك طريقة بسيطة لجعل المكثف يبدأ بالتفريغ باستخدام أنبوب مليء بالغاز. ينهار كهربائيًا عندما يصل فرق الجهد بين طرفيه إلى قيمة معينة V_0. وبعد أن ينتهي التفريغ، يتوقف الأنبوب عن توصيل التيار. وتكرر عملية إعادة الشحن نفسها بالبدء من جهد منخفض V_0. يبين (الشكل 19-23) دارة ما، حيث تنتج جهدًا كسنّ المنشار.

تطبيق الفيزياء

جهد سنّ المنشار الضوء الوميضي

وقد يكون مصباح الضوء الوميضي أحد تطبيقات دارة توليد ذبذبة سنّ المنشار. في هذه الحالة تعمل البطارية كمصدر للقوة الدافعة الكهربائية (emf). ويومض أنبوب التفريغ (مصباح النيون) بمعدل ربّما يساوي دورة واحدة لكلّ ثانية. إنّ الجزء الأساسيّ في وحدة الوميض هذه، هو مواسع كبير بشكل معتدل.





الشكل 19-23 (أ) دارة RC موصولة مع أنبوب مليء بالغاز يعمل كمفتاح، يمكن لهذه الدارة توليد جهد متكرر مثل سنّ المنشار، كما هو مبين في (ب).

تطبيق الفيزياء

ماسحات زجاج السيارات

يمكن أن تستعمل دارة RC أيضًا في موقّت نظام ماسحات الزجاج الأمامي للسيارات. حيث يحدد ثابت الزمن RC عدد المرات التي تتحركها الماسحات. يتم التحكم بهذا العدد من خلال مفتاح ذي مواقع متعددة لإعطاء قيم مختلفة للمقاومة R مع ثبات C.

تطبيق الفيزياء

جهاز تنظيم نبضات القلب

يعدّ جهازُ تنظيم نبضات القلب الإلكتروني الاستعمالَ الطبي المهم لدارة RC، حيث يحفّز القلب المتوقف للنبض مرة أخرى وذلك بتطبيق محفز كهربائي من خلال أقطاب كهربائية موصولة مع صدر المريض. يمكن تكرار التحفيز بالمعدل الطبيعي لنبضات القلب إذا كان ذلك ضروريًّا. يحتوي القلب نفسه على خلايا لتنظيم نبضاته التي ترسل ذبذبات كهربائية صغيرة جدا بمعدل من 60 إلى 80 ذبذبة في كل دقيقة. تحث هذه الذبذبات على بدء كل نبضة من نبضات القلب. في بعض أمراض القلب يفشل منظم القلب الطبيعي في أداء وظيفته بشكل صحيح. وبالتالي، يفقد القلب نبضه. يستعمل مثل هؤلاء المرضى جهاز تنظيم نبضات القلب الإلكتروني الذي ينتج بشكل منتظم ذبذبة جهد تجعل القلب ينبض، وتتحكم أيضًا في تكرار نبضاته. تزرع الأقطاب الكهربائية في القلب أو بالقرب منه كما في (الشكل 19-24). وتحتوي الدارة على مواسع ومقاومة. تزداد الشحنة على المكثف إلى حد معين ثم تفرغ. ومن ثمّ يبدأ بالشحن مرة أخرى. يعتمد معدل التذبذب على قيم R، و C.



الشكل 19-24 بطارية إلكترونية تزود جهاز تنظيم نبضات القلب بالطاقة، كما تظهر في صورة أشعة X للقفص الصدري لمريض.

19-7 الأخطار الكهربائية

يمكن أن تعمل زيادة شدة التيار على تسخين أسلاك الكهرباء في البنايات ويتسبب في حدوث حريق، كما وضّحْنَا ذلك في (البند 18-6) . ويمكن أن يؤدّي التيار الكهربائي أيضًا إلى إلحاق الضرر بجسم الإنسان، أو قد يكون قاتلًا . إنّ مرور التيار الكهربائي خلال جسم الإنسان قد يسبب الأذى بطريقتين هما: 1- يعمل التيار الكهربائي على تسخين الأنسجة، وبالتالي يمكن أن يتسبب في احتراقها. 2- يحفز التيار الكهربائي الأعصاب والعضلات (التي تعمل كهربائيا، كما لاحظنا في البندين 17-11 و 18-10) ونشعر بالصدمة الكهربائية. تعتمد شدة الصدمة على مقدار التيار، وفترة تأثيره، والجزء من الجسم الذي تمر فيه. إن التيار الذي يمر في الأعضاء الحيوية مثل القلب أو الدماغ يمثل خطرًا حقيقيا؛ لأنه قد يتداخل مع عمل هذه الأعضاء.

تطبيق الفيزياء

خط الكهرباء

يشعر أغلب الناس بالتيار الكهربائي عندما تكون شدته حوالي 1mA. أما التيارات التي تكون شدتها في حدود عدد قليل من mA، فإنها تسبب آلاما، ولكنها نادرًا ما تسبب ضرار كبيرا للإنسان السليم. تسبب التيارات التي تكون شدتها أكثر من 10mA تقلصا شديدا في العضلات، وقد لا يتمكن الشخص التخلص من مصدر التيار (كجهاز كهربائي أو سلك معرّى). ويمكن حدوث الوفاة بسبب شلل الجهاز التنفسي. ومع ذلك، يمكن استعمال التنفس الاصطناعي لإنعاش المصاب. أما إذا مر تيار شدته أكبر من حوالي 80-100mA خلال الجذع بحيث يمر جزء منه خلال القلب لأكثر من ثانية أو ثانيتين، فإنّ عضلات القلب تبدأ بالانقباض بشكل غير منتظم وبالتالي، فإنّ الدم لا يضخّ بالشكل المطلوب. تُسَمّى هذه الحالة بالانقباض العضلي البُطيني، وهي تؤدي إلى الوفاة إذا استمرت لفترة زمنية طويلة. والغريب أنه إذا كان التيار أكبر من ذلك بكثير (في حدود 1 A)، فإن الوفاة بسبب عجز القلب ليست مرجحة*، ولكن قد تسبب مثل هذه التيارات حروقا خطيرة، وخاصة إذا كانت في مساحة صغيرة من الجسم.

تعتمد خطورة الصدمة الكهربائية على الجهد المؤثر، وعلى المقاومة الفاعلة للجسم أيضًا. فالنسيج الحيّ قليل المقاومة؛ لأن السائل في الخلايا يحتوي على أيونات يمكنها توصيل الكهرباء بشكل جيد. وعلى أيّ حال، فإنّ مقاومةَ الطبقة الخارجية للجلد كبيرةٌ عندما تكون جافة، لذا فإنّها تحمي الجسم. عندما يكون الجلد جافا، تكون المقاومة الفاعلة بين نقطتين على جانبين متقابلين من الجسم في حدود $10^4\ \Omega$ إلى $10^6\ \Omega$. ولكن عندما يكون الجلد رطبًا، فإن المقاومة تصل إلى $10^3\ \Omega$ أو أقل.

* يبدو واضحًا أن التيارات الكبيرة تؤدي إلى توقف القلب بشكل تام. وعندما يتوقف التيار، يعود القلب إلى إيقاعه الطبيعي. وقد لا يحدث ذلك عندما يحدث الانقباض العضلي؛ لأنه حالما يبدأ ، يصعب توقفه. وقد يحدث الانقباض العضلي أيضًا نتيجة للنوبة القلبية أو خلال جراحة القلب. يمكن استعمال جهاز يسمى مانعَ الانقباض العضلي لتزويد القلب بتيار كبير لفترة قصيرة، ويسبب ذلك توقف القلب بشكل تام، ويتبع ذلك عادة عمل القلب بشكل طبيعي.

إنّ الشخص الذي يكون حافي القدمين أو نعل حذائه رقيقًا، يكون على اتصال مباشر مع الأرض. وعندما يلامس خط جهد V -120 ويده رطبة ينتج من ذلك تيار شدته

$$I = \frac{120\text{ V}}{1000\ \Omega} = 120\text{ mA}$$

وكما رأينا سابقًا، فإنّ هذا التيار قد يكون مميتًا.

إنّ الشخص الذي يتعرض للصدمة الكهربائية يصبح جزءًا من دارة كاملة. يبين (الشكل 19-25) طريقتين يمكن من خلالهما أن تكتمل الدارة. فعندما يلامس شخصٌ ما فجأةً سلكَ كهرباء ذا جهد مرتفع مثل 120 V (الجهد الكهربائي المنزلي) بالنسبة إلى الأرض، فإنّ الجانب الآخر من أسلاك التوصيل في البناية موصول مع الأرض، إمّا من خلال سلك يوصل مع موصل مخفي في الجدران، أو من خلال أنبوب يصل إلى الأرض. في (الشكل 19-25أ) يمر التيار من سلك الجهد المرتفع، خلال الشخص، إلى الأرض من خلال قدميه الحافيتين، ويعود من خلال الأرضية (موصل جيد) إلى طرف التأريض للمصدر. أمّا إذا كان الشخص واقفًا على عازل جيد- كأن يكون نعل حذائه مصنوعًا من المطاط السميك، أو واقفًا على أرضية خشبية جافة- فإنّ مقاومة الدارة أكبر بكثير. وعليه، فإنّ شدّة التيار المار خلال الشخص قليلة. ولكن إذا وقف الشخص حافي القدمين على الأرض، أو كان في حوض الاستحمام، فإنّ هناك خطرًا مميتًا؛ لأنّ المقاومةَ قليلةٌ وشدّة التيار كبيرة؛ ففي حوض الاستحمام (أو حوض السباحة) لا يكون جسمك رطبًا فقط، ولكن الماء أيضًا متصل من خلال أنبوب التصريف مع الأرض. ولذلك يُوصى بعدم لمس أي شيء كهربائي عندما تكون مبلولا أو حافي القدمين. في (الشكل 19-25 ب) يلمس شخص سلكًا ذا جهد مرتفع معرّى بإحدى يديه، ويلمس باليد الأخرى صنبور ماء (موصول مع الأرض من خلال الأنبوب). هذا التيار خطير جدًّا؛ لأنّه يمرّ خلال الصدر عبر القلب والرئتين. وإليك طريقة تمت تجربتها: إذا لمست إحدى يديك شيئًا ما كهربائيًّا، فاجعل يدك الأخرى في جيبك (لا تستعملها) وانتعل حذاء نعله مصنوع من المطاط السميك. وهناك فكرة جيدة أيضًا وهي إزالة الجوهرات المعدنية وخصوصًا الخواتم (عادة، يكون الجزء من الأصبع الذي تحت الخاتم رطبا).

يمكن أن يوصل جسمك مع سلك ذي جهد مرتفع عن طريق لمس سلك مُعرّى بَليت المادة العازلة التي عليه، أو من خلال سلك مُعرّى داخل جهاز كهربائي عندما تحاول إصلاحه. (دائمًا، افصل التيار عن الجهاز الكهربائي قبل التحقق مما في داخله) وهناك احتمالية أخرى هي أن ينقطع سلك في الجهاز، أو يفقد المادة العازلة التي عليه ويصبح موصولاً مع هيكل الجهاز. إذا كان الهيكل معدنيا، فإنه يوصل الكهرباء. ويمكن أن يتعرض الشخص لصدمة كهربائية شديدة عند لمس هيكل الجهاز. كما هو موضح في (الشكل 19-26 ب). لتجنب مثل هذا الحادث؛ فإن الهياكل المعدنية من المفترض أن توصل مباشرة مع الأرض بواسطة سلك تأريض منفصل. عندها، إذا لمس سلكٌ ذو جهد مرتفع هيكلَ جهاز موصول مع الأرض، فإنّ الدارة تقصر تلقائيًّا . كما هو مبين في (الشكل 19-26 جـ) ويمرّ أغلب التيار في سلك التأريض الذي مقاومته صغيرة بدلًا من مروره خلال الشخص. علاوة على ذلك، فإن التيار الذي شدته كبيرة، يجب أن يؤدي إلى فتح صمام الأمان أو قاطع الدارة.

* يمكن أن تصاب بصدمة سيئة من مكثف لم يتم تفريغه قبل أن تلامسه.

الشكل 19-25 يتعرض الشخص لصدمة كهربائية عندما تكتمل الدارة.

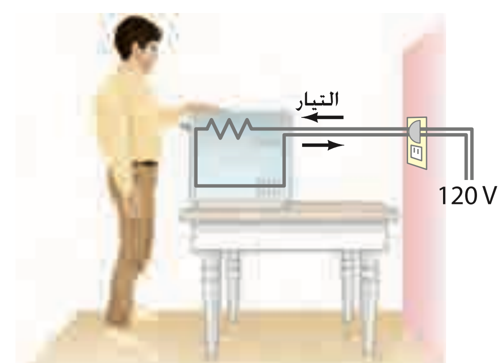
تنويه:

عندما تلمس إحدى يديك الكهرباء، اجعل يدك الأخرى في جيبك.

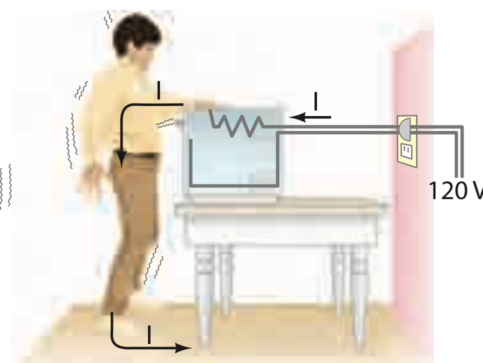
تطبيق الفيزياء

التأريض و الصدمات

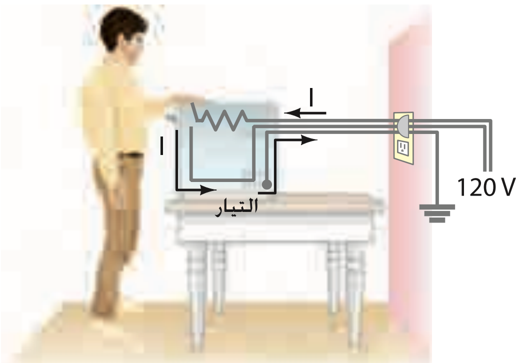
الشكل 19-26 (أ) فرن كهربائي يعمل طبيعيا عند توصيله مع مفتاح ثنائي لمصدر كهربائي. (ب) تقصر الدارة للحالة التي لا يكون فيها الهيكل موصولا مع الأرض: صدمة كهربائية. (جـ) تقصر الدارة للحالة التي يكون فيها الهيكل موصولا مع الأرض من خلال قابِس ثلاثي.



(أ)



(ب)



(جـ)

يتمّ تأريض الهيكل المعدني لجهاز بواسطة سلك تأريض منفصل وموصول مع الشعبة الأسطوانية الثالثة للقابس ثلاثي الأطراف (الشكل 19-27 أ). لا تقطع الشعبة الثالثة للقابس؛ فقد يكون هذا قاتلا.

لماذا نحتاج إلى السلك الثالث؟ ينقل الجهد 120 V بواسطة السلكين الآخرين؛ أحدهما ذو جهد **مرتفع** (120 V *ac*) والآخر **محايد**، وهو نفسه موصول مع الأرض*. قد يبدو سلك التأريض الثالث الموصول مع الشعبة الأسطوانية للقابس على أنّه زائد عن الحاجة. ولكنّه يوفّر الحماية لسببين هما: 1- يحمي من التوصيلات الداخلية التي قد تكون موصولة بشكل غير صحيح. 2- يمر التيار العادي في السلك المحايد (التيار الذي يعود من المصدر 120 V) الذي له مقاومة. لذا، فقد يكون هناك هبوط في الجهد على طول هذا السلك؛ في العادة يكون قليلًا، ولكن إذا كانت التوصيلات رديئة، أو مغطاة بالصدأ، أو أن القابس ليس موصولا بشكل جيد مع مصدر الجهد، فإنّ المقاومة يمكن أن تكون كبيرةً بما فيه الكفاية، بحيث إنّك قد تتأثر بذلك الجهد إذا لمست السلك المحايد من مسافةٍ ما من نقطة تأريضه.

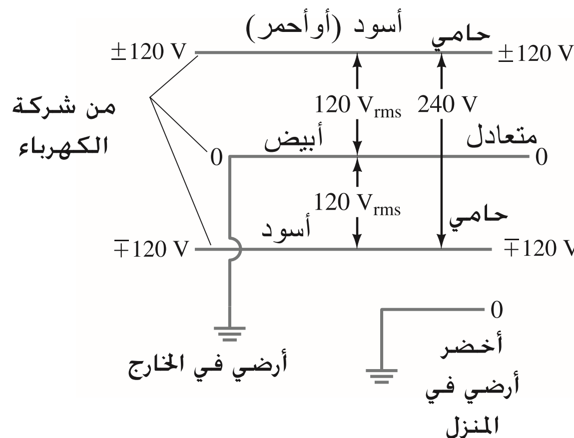
إنّ بعض الأجهزة الكهربائية ذات سلكين فقط، ولكن عرض كل شعبة من شعبتي القابس يكون مختلفًا، ويمكن أن يدخل القابس في مخرج التيار بحيث يتصل المحايد (الشعبة التي يكون عرضها أكبر) المقصود في الجهاز مع المحايد في توصيلات الأسلاك. فعلى سبيل المثال، يقصد من التسنينات اللولبية للمصباح الكهربائي أن تكون موصولة مع المحايد (وتوصل القاعدة مع السلك ذي الجهد المرتفع) لتجنب الصدمة الكهربائية عند تبديل المصباح. والهيكل المعدني للجهاز ذات القابس ثنائي الشعبة لا يكون موصولا مع الأرض. ولذلك، يجب أن يكون العزل الكهربائي في مثل هذه الأجهزة مضاعفًا. وفي الأحوال جميعها، يجب أن تكون حذرًا للغاية.

قد يكون العازل الذي على السلك ذا تشفير لونيّ. الأسلاك الرئيسة في أجهزة القياس المحمولة يدويا قد تكون حمراء اللون (ذات جهد مرتفع) وسوداء اللون (موصولة مع الأرض). أما في المنازل، فيكون السلك الأسود عادة ذا جهد مرتفع (أو قد يكون السلك الأحمر اللون) في حين أن اللون الأبيض هو المحايد، والسلك الأخضر هو المخصص للتوصيل مع الأرض.

ولكن احذر: هذا التشفير اللوني لا يمكن الوثوق به دائمًا. توفر قواطع الدارة العادية (كما في البندين 6-18 و 20-7) الحماية للأجهزة الكهربائية والبنايات من الحمل الزائد وخطر الاشتعال. وتوفر أيضًا الحماية للبشر في بعض الحالات، مثل التيارات التي شدتها كبيرة الناجمة من قِصر الدارة، أو عطل فيها إذا كانت استجاباتها سريعة بما فيه الكفاية. تصمم قواطع التفريغ الأرضي الخاطيء في ¬التأريض- وضحت في (البند 8-21) لحماية الناس من التيارات (10mA إلى 100mA) التي شدتها أقل بكثير من شدة التيارات القاتلة، ولكنها لا تجعل الدارة التي يمر فيها تيار شدته 15 A مفتوحة، أو تؤدي إلى حريق صمام أمان يتحمل تيار شدته 20 A.

* في الولايات المتحدة، يدخل إلى المنزل ثلاثة أسلاك من شركة الكهرباء؛ سلكان جهدهما مرتفع(حاميان) كلّ منهما 120 V (تشكلان ما مجموعه 240 V لتشغيل الأدوات أو الأجهزة التي تعمل على جهد 240 V) بالإضافة إلى السلك المحايد الذي يوصل مع الأرض (يحمل التيار الذي يعود من السلكين الحاميين). انظر في الأسفل إلى (الشكل 19-28). السلك المخصص للتوصيل مع الأرض (لا يتحمل تيارا كهربائيا) هو السلك الرابع الذي يدخل البيت من وتد ثقيل مثبت في الأرض ومطمور، أو من خلال أنبوب معدني مخفي، أي أنّ السلك الرابع ليس من شركة الكهرباء.

الشكل 19-28 أربعة أسلاك تدخل إلى المنزل العادي. التشفير اللوني للأسلاك ليس دائمًا كما يظهر هنا؛ كن حذرًا.




(أ)


(ب)


(ج)

الشكل 19 - 27 (أ) الشعب الثلاثة (ب) وصلة (رمادية اللون) لمخارج ثنائية من النوع القديم- تأكد من تثبيت الشعبة المخصصة للتوصيل مع الأرض. (جـ) قابس ذو شعبتين، إحدى شعبتيه عريضة يتم من خلالها التوصيل مع الأرض.

تنويه:
السلك الأسود قد يكون ذا جهد مرتفع(حاميا) أو للتوصيل مع الأرض.

إنّ التيار الكهربائي هو الذي يسبب الأذى، و فرق الجهد هو الذي يتسبب في تدفقه. أحيانًا، يُقال إنّ حدّ العتبة للخطر يساوي 30 V. ولكن حتى بطارية السيارة ذات 12-V (يمكنها إنتاج تيارات ذات شدّة كبيرة) قد تسبّب حروقًا خطيرة وصدمة كهربائية.

تيار التسرب

وهناك خطر آخر هو **تيار التسرب** الذي يقصد به التيار المتدفّق عبر مسار غير مخطّط له. تقارن تيارات التسرب في أغلب الأحيان سعويًا. فعلى سبيل المثال، فإنّ السلك في المصباح الكهربائي يشكّل مواسعًا مع الجزء السفلي الفلزي للمصباح. تتجاذب الشحنات التي تتحرك في موصل أو تتنافر مع الشحنة التي في موصل آخر، لذلك يكون هناك تيارٌ. تحدد الشيفرات الكهربائية المثالية تيار التسرب لأيّ جهاز بمقدار 1mA. إنّ تيار التسرب الذي تصل شدته إلى 1mA لا يسبب الأذى، ولكنه قد يكون خطيرًا جدًّا بالنسبة إلى مريض في مستشفى، وقد غرز في جسمه أقطاب فلزية موصولة مع الأرض من خلال المعدات؛ بسبب عدم وجود طبقة الجلد الواقية، ولأنّ التيار قد يمرُّ مباشرةً خلال القلب مقارنةً مع الوضع الطبيعي حيث يدخل التيار من اليدين وينتشر خلال الجسم. وعلى الرغم من أنه قد يتطلب تيارًا شدته 100mA ليتسبب في حدوث الانقباض العضلي للقلب عندما يدخل التيار من اليدين (في الحقيقة يمر جزء قليل جدًّا منه خلال القلب) إلا أنّه تبين أنّ تيارًا قليلًا جدًّا في حدود 0.20mA يتسبب في حدوث الانقباض العضلي للقلب عندما يمرّ مباشرة خلاله. لذلك، فإنّ المريض الموصول بجسده أسلاك كهربائية يكون في خطر كبير من تيار التسرب حتى عند القيام بعمل بسيط مثل لمس مصباح كهربائي.

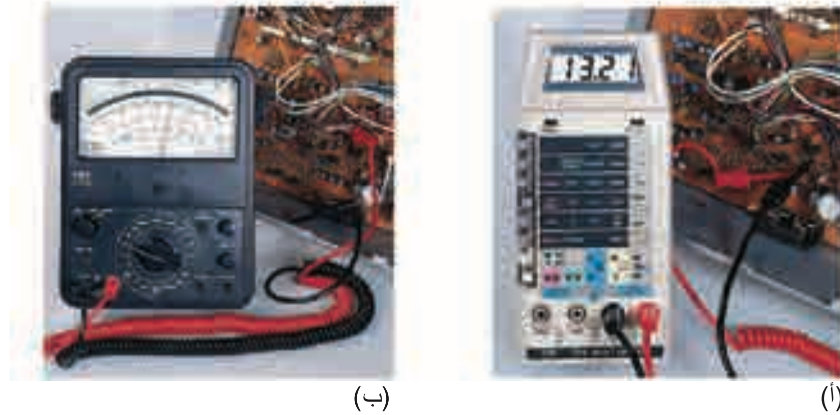
أخيرًا، إذا حدث وانقطع أحد خطوط الكهرباء التي تصل بين الأعمدة وتدلى على الأرض، فلا تلمسه أبدًا- فهذا مميت- ولا تقترب منه أيضًا. إنّ خطّ الكهرباء يمثل جهدًا عاليًا يصل إلى آلاف الفولتات، حيث يمكن أن يتدفق تيار ضخم على طول الأرض أو الرصيف من عند النقطة التي يلامس فيها خطّ الكهرباء الأرض إلى نقطة تأريض الخط المحايد، مما قد يجعل الجهد بين قدميك كبير جدّا.

فكرة مفيدة: في مثل هذه الحالة، قف على إحدى قدميك أو اركض (قدم واحدة تلمس الأرض في أيّ لحظة).

* 8-19 الأميتر والفولتميتر

تطبيق الفيزياء
مقاييس DC

يستخدم **الأميتر** لقياس التيار، في حين يقيس **الفولتميتر** فرق الجهد أو الجهد. تتم عملية قياس التيار والجهد بواسطة أجهزة قياس على نوعين هما: 1- أجهزة قياس ذات مؤشر: تعرض القيم العددية بواسطة وضع مؤشر يمكنه الحركة عبر تدريج (الشكل 19-29أ). 2- أجهزة قياس رقمية؛ تعرض القيم العددية بواسطة الأرقام (الشكل 19-29 ب). والآن، سنناقش أجهزة القياس نفسها وكيفية عملها، ثم كيفية ربطها مع الدارات لعمل الأقيسة. وسنناقش أخيرًا أثر استعمال أجهزة القياس في الدارة موضع القياس. قد تصل إلى نتائج غير صحيحة؛ فما العمل؟



(أ) (ب)

الشكل 19-29 (أ) جهاز قياس متعدد الأغراض ذو مؤشر يستخدم كفولتميتر. (ب) جهاز قياس رقمي إلكتروني.

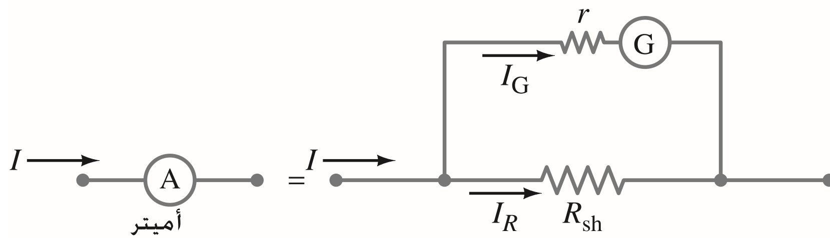
* الأميتر والفولتميتر ذو المؤشر

الجلفانوميتر هو الجزء الأساسي في الأميتر ذي المؤشر أو الفولتميتر. وفيهما، تؤخذ القراءة بواسطة مؤشر يتحرك على تدريج (الشكل 19-29 أ). يعمل الجلفانوميتر على مبدأ القوة بين مجال مغناطيسي وملف لسلك يحمل تيارًا، وسوف ندرسه في (الفصل 20). وما نحتاج إليه الآن هو مجرد معرفة أن انحراف مؤشر الجلفانوميتر يتناسب مع التيار الذي يمر فيه.

إنّ حساسية الجلفانوميتر للقيمة القصوى للتيار. mI. تمثل التيار اللازم لجعل المؤشر ينحرف انحرافًا كاملا.

يمكن أن يستخدم الجلفانوميتر مباشرة لقياس تيارات dc صغيرة. فعلى سبيل المثال، الجلفانوميتر الذي حساسيته mI تساوي 50Aμ يمكنه القياس من حوالي 1Aμ (من الصعب قراءة التيارات التي أصغر من ذلك على التدريج) حتى50Aμ . لقياس تيارات أكبر: يتم ربط مقاومة على التوازي مع الجلفانوميتر. وهكذا نحصل على أميتر يمثل بالرمز •Ⓐ• يحتوي على جلفانوميتر (•Ⓖ•) على التوازي مع مقاومة تُسَمَّى مقاوم مجزئ التيار. كما هو موضح في (الشكل 19-30) . (مجزئ التيار هي المرادف للتوصيل على التوازي). إنّ مقاومة مجزىء التيار هي R_{sh}. ومقاومة ملف الجلفانوميتر الذي يمر خلاله التيار r. يتم اختيار قيمة R_{sh} وفقًا لكامل التدريج المطلوب أن ينحرفه المؤشر- تكون R_{sh} عادة صغيرة جدّا- لتعطي أميترا مقاومته المكافئة صغيرة جدّا- لذلك يمر أغلب التيار خلال المقاومة R_{sh} . في حين يمر جزء قليل جدًّا من التيار ($\lesssim 50\,\mu A$) خلال الجلفانوميتر لينحرف المؤشر.

تستخدم في الأميتر مقاومة توصل على التوازي لتجزيء التيار.



الشكل 19-30 الأميتر عبارة عن جلفانوميتر موصول على التوازي مع مقاوم مقاومته صغيرة، R_{sh}

المثال 19-14 تصميم أميتر

صمّم أميترا يقرأ تيارًا شدّته $1.0A$ عندما ينحرف مؤشره انحرافًا كاملا. استخدم جلفانوميترا حساسية كامل التدريج فيه تساوي $50A\mu$. ومقاومته $r = 30\Omega$. تأكد هل التدريج خطيّ.

النّهج: يجب أن يمر $50\,\mu A$ فقط ($=I_G=0.000050A$) من التيار $1.0A$ خلال الجلفانوميتر حتى ينحرف مؤشره انحرافًا كاملاً. أما الجزء الباقي من التيار ($I_R = 0.999950A$) فيمر خلال مقاومة صغيرة R_{sh} تجزىء التيار. (الشكل 19-30) . الفرق في الجهد بين طرفي الجلفانوميتر يساوي الفرق في الجهد بين طرفي المقاومة R_{sh} (موصولان على التوازي). يمكننا تطبيق قانون أوم لإيجاد المقاومة R_{sh}.

الحلّ: بما أنّ $I=I_G+I_R$. لذا عندما يتدفق التيار $I=1.0A$ خلال جهاز القياس. فإننا نريد أن يكون التيار الذي يمر خلال المقاومة Rsh الموصولة على التوازي مساويًا لـ $I_R=0.999950A$ هو الفرق في الجهد نفسه بين طرفي الجلفانوميتر. لذا يخبرنا قانون أوم بأنّ

$$I_R R_{sh} = I_G r$$

وبالتالي

$$R_{sh} = \frac{I_G r}{I_R} = \frac{(5.0 \times 10^{-5}\,\text{A})(30\,\Omega)}{(0.999950\,\text{A})}$$
$$= 1\,5 \times 10^{-3}\,\Omega$$

أو $0.0015\ \Omega$. وهذا يعني أنّ المقاومة R_{sh} التي يجب أن توصل على التوازي مع الجلفانوميتر يجب أن تكون صغيرة جدًا. وبالتالي. يمر أغلب التيار من خلالها.

إذا كان التيار I الذي يمر في جهاز القياس يساوي $0.50A$. فإنّ التيار الذي يمر في الجلفانوميتر يساوي

$$I_G = \frac{I_R R_{sh}}{r} = \frac{(0.50\,\text{A})(1.5 \times 10^{-3}\,\Omega)}{30\,\Omega}$$
$$= 25\,\mu\text{A},$$

وهذا يعطي انحرافًا حتى منتصف كامل التدريج. لذا. فالتدريج خطّيّ.

يتكوّن الفولتميتر (•Ⓥ•) أيضًا من جلفانومتير ومقاوم. لكن المقاوم R_{ser} يربط على التوالي. الشكل 19-31. ومقاومته عادةً كبيرةً. لنحصل على فولتميتر مقاومته الداخلية كبيرة.

يستخدم الفولتميتر مقاوما يربط على التوالي.



الشكل 19-31 الفولتميتر عبارة عن جلفانوميتر موصول على التوالي مع مقاوم مقاومته كبيرة، Rser.

تمرين (و) استخدم الجلفانوميتر الوارد في (المثال 19-14) نفسه، مع مقاومة داخلية r=30 Ω وافرض أنّ حساسية الجلفانوميتر للقيمة القصوى للتيار تساوي $50A\mu$. ثمّ طبّقْ قانون أوم لتحديد قيمة R_{ser} اللازمة لعمل فولتميتر يقرأ من صفر إلى 15 V.

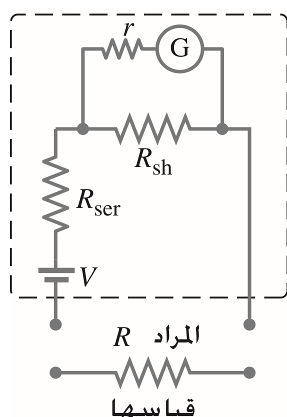
تستخدم أجهزة القياس التي وُصفت هنا لقياس التيار المستمر. ويمكن تعديل جهاز قياس *dc* ليقيس *ac* (التيار الترّدد، البند 18-7) وذلك بإضافة دايود (الفصل 29) الذي يسمح بمرور التيار في اتّجاه واحد فقط. يمكن معايرة جهاز قياس *ac* لقراءة *rms* أو قيم الذروة.

أجهزة قياس AC

للفوليميتر والأميتر العديد من المقاومات الموصولة على التوالي أو التوازي بغرض اختيار المجال المناسب للقياس. تستطيع أجهزة القياس متعددة الأغراض قياس الجهد، والتيار، والمقاومة. أحيانًا، تسمى أجهزة القياس متعددة الأغراض بِـــ VOM(جهاز قياس *Ohm-Volt* أو جهاز قياس ملي أميتر *Ohm-Volt*).

أجهزة متعددة القياس
VOM
مقياس الأوم

يقيس الأوميتر المقاومة. ويجب أن يحتوي على بطارية فولتيتها معلومة وموصولة على التوالي مع مقاومة R_{ser} وأميتر (الشكل 19-32). إنّ المقاوم الذي سوف تقاس مقاومته يكمل الدارة المبينة في (الشكل 19-32). ويتناسب انحراف المؤشر عكسيًا مع المقاومة. تعتمد معايرة التدريج على قيمة المقاوم الموصول على التوالي. وبما أنّ الأوميتر يمرّر تيارا خلال الجهاز الذي سوف تقاس مقاومته، لذلك يجب ألا يستخدم لقياس مقاومة الأجهزة الحسّاسة جدًّا؛ لأنّه قد يتلفها نتيجة للتيار.



الشكل 19 - 32 الأوميتر

تحدّدُ **حساسيّة** جهاز القياس عمومًا على واجهته الأمامية. وقد تُعطى بدلالة عدد من وحدات الأوم لكلّ فولت، والذي يشير إلى مقدار عدد الأومات للمقاومة موجود في جهاز القياس لكلّ فولت من قراءة كامل التدريج. على سبيل المثال، إذا كانت الحساسية تساوي 30,000 V/Ω فهذا يعني أنّه على التدريج 10 V يكون لجهاز القياس مقاومة تساوي 300,000 Ω. أما على التدريج 100 V، فتكون مقاومة جهاز القياس 3MΩ.حساسية القيمة القصوى للتيار Im، التي تمت مناقشتها سابقًا، هي عبارة عن مقلوب الحساسية بوحدة Ω/V.

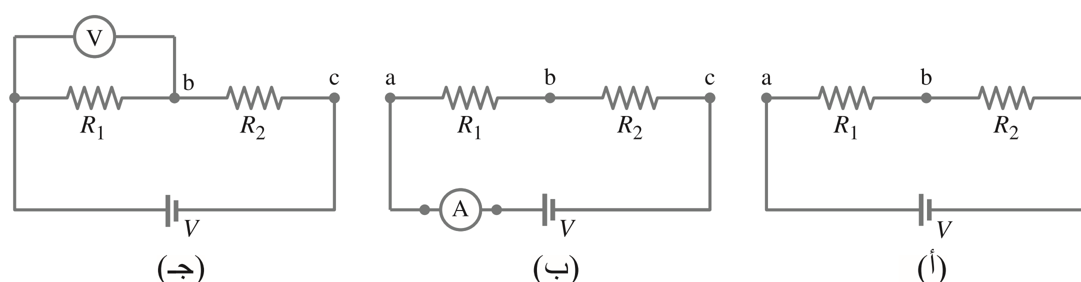
* وصل أجهزة القياس

تطبيق الفيزياء

كيف تستخدم أجهزة القياس بشكل صحيح؟

افرض أنّك تريد تحديد التيار I في الدارة المبنية في (الشكل 19-33أ) والفرق في الجهد بين طرفي المقاومة R_1. كيف يتم وصل الأميتر والفولتميتر مع الدارة موضع القياس بالضبط ؟

الشكل 19 - 33 قياس التيار والجهد



بما أنّ الأميتر يستخدم لقياس التيار الذي يتدفق في الدارة، فيجب أن يدخل مباشرة إليها. أي، يتمّ وصله على التوالي مع العناصر الأخرى كما هو مبين في (الشكل 19-33ب). كلما كانت مقاومته الداخلية أصغر، قلّ تأثيره في الدارة.

يدخل الأميتر إلى الدارة

ومن جهة أخرى، يتم وصل الفولتميتر خارجيًّا على التوازي مع عنصر الدارة المطلوب قياس فرق الجهد بين طرفيه. أي أنّ الفولتميتر يستخدم لقياس الفرق في الجهد بين نقطتين. سلكا التوصيل خاصته (أسلاك التوصيل) يتمّ وصلها مع النقطتين، كما هو موضّح في (الشكل 19-33جـ) حيث يتمّ قياس فرق الجهد بين طرفي المقاومة R_1. كلّما زادت مقاومته الداخلية، (R_{ser}+r) في (الشكل 19-31)، قلّ تأثيره في الدارة موضع القياس.

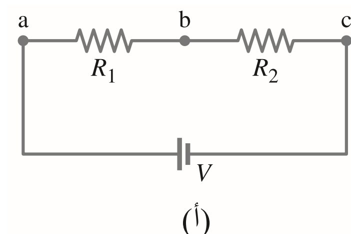
يوصل الفولتميتر على التوازي.

* تأثيرات مقاومة جهاز القياس

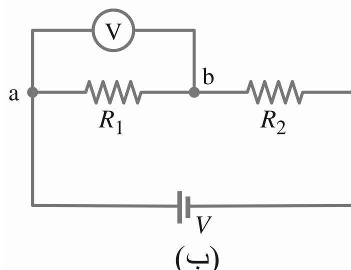
تُعدّ معرفة حساسيّة جهاز القياس ضرورية؛ لأنّ مقاومة جهاز القياس تؤثّر بشكلٍ جدّيٍّ في نتائج القياس لكثيرٍ من الحالات. لنتناول المثال التالي:

تطبيق الفيزياء

تصحيح لمقاومة جهاز القياس



(أ)



(ب)

الشكل 19 - 34 (المثال 19-15)

المثال 19-15 قراءة الجهد مقابل الجهد الحقيقي

افرض أنّك تختبر دارة إلكترونية تحتوي على مقاومتين R_1، و R_2، كلّ واحدةٍ منهما $k15\Omega$ موصولتين على التوالي كما هو موضح في (الشكل 19-34 أ). المقاومة الداخلية للبطارية مهملة. وتعمل على إيجاد فرق جهد مقداره $8.0\ V$ بين طرفي المقاومتين. ثُبت تدريج فولتميتر حساسيّته $10{,}000\ V/\ \Omega$ على $5.0\ V$. ما الجهد الذي يقرأه جهاز القياس عند وصله بين طرفي المقاومة R_1. (الشكل 19-34ب)؟ وما الخطأ الذي تسببه المقاومة المحددة لجهاز القياس؟

النّهج: يعمل جهاز القياس كما لو أنّه مقاوم موصول على التوازي مع المقاومة R_1. وسنستخدم الآن قاعدتي وصل المقاومات على التوازي والتوالي، و كذلك قانون أوم لإيجاد التيّارات والجهود.

الحلّ: عندما يثبت تدريج الفولتميتر على $50\ V$، فستكون مقاومته الداخلية $(5.0\ V)(10{,}000\ \Omega/V) = 50{,}000\ \Omega$. وعند وصله بين طرفي المقاومة R_1. كما في (الشكل 19-34ب). فإنّ هذه المقاومة $50k\ \Omega$ تكون موصولة على التوازي مع $R_1 = 15\ k\Omega$. تساوي المقاومة المكافئة R_{eq} للمقاومتين

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{50\ k\Omega} + \frac{1}{15\ k\Omega} = \frac{13}{150\ k\Omega}$$

لذا، فإنّ $R_{eq} = 11.5\ k\Omega$. وهذه المقاومة $R_{eq} = 11.5\ k\Omega$. موصولة على التوالي مع المقاومة $R_2 = 15k$. وعليه، فإنّ المقاومة الكلية للدارة تكون $26.5k\Omega$ (بدلًا من المقاومة الأصلية $30k\ \Omega$). إذن، التيار الذي يتدفق من البطارية يساوي

$$I = \frac{8.0\ V}{26.5\ k\Omega} = 3.0 \times 10^{-4}\ A = 0.30\ mA$$

وهكذا، فإنّ الهبوط في الجهد بين طرفي المقاومة R_1، وهو نفسه بين طرفي الفولتميتر ويساوي $(3.0 \times 10^{-4}\ A)(11.5 \times 10^3\ \Omega) = 3.5\ V$ [الهبوط في الجهد بين طرفي المقاومة R_2 يساوي $(3.0 \times 10^{-4}\ A)(15 \times 10^3\ \Omega) = 4.5\ V$. ليكون المجموع الكلي $8.0\ V$]. إذا افترضنا أنّ جهاز القياس دقيق، فإنّ قراءته ستكون $3.5\ V$. في الدارة الأصلية، ودون وجود جهاز القياس، $R_2 = R_1$. ولهذا، فإنّ الفرق في الجهد بين طرفي R_1 هو نصف ذاك الذي بين طرفي البطارية، أي $4.0\ V$. وهكذا نجد أنّ الفولتميتر يعطي قراءة أقلّ بسبب مقاومته الداخلية. في هذه الحالة أقل بـ $0.5\ V$، أي أكثر من 10%.

يوضح (المثال 19-15) كيف يمكن أن يؤثر جهاز القياس في الدارة ويعطي قراءة مضللة. على أيّ حال، إذا كانت مقاومة الفولتميتر أكبر من مقاومة الدارة بكثير، فإنّ تأثيره يكون قليلًا ويمكن الوثوق بقراءته، على الأقلّ من ناحية دقة صنع جهاز القياس، وهي تتراوح بين 3% إلى 4% من قراءة كامل التدريج بالنسبة إلى جهاز القياس ذي المؤشر. ويمكن أن يتداخل الأميتر مع دارة أيضًا، ولكن تأثيره يكون أقلّ ما يمكن إذا كانت مقاومته أقلّ بكثير من المقاومة الكلية للدارة. وبالنسبة إلى كلٍّ من الأميتر والفولتميتر، كلما زادت حساسية الجلفانوميتر قلّ تأثيره. فمثلاً جهاز القياس الذي حساسيته $50{,}000\ v/\ \Omega$ أفضل بكثير من الجهاز الذي حساسيته $1000\ \Omega/v$.

* أجهزة القياس الرقمية

تستخدم أجهزة القياس الرقمية (انظر الشكل 19-29(ب)) بالطريقة نفسها التي تستخدم بها أجهزة القياس ذات المؤشر: حيث تُدخل مباشرة إلى الدارة، على التوالي، لقياس التيار (الشكل 19-33(ب)). وتربط خارجيًا على التوازي مع الدارة لقياس الجهد (الشكل 19-33 (جـ)).

يختلف التركيب الداخلي لأجهزة القياس الرقمية عن ذاك الذي لأجهزة القياس ذات المؤشر، من حيث إنّ أجهزة القياس الرقمية لا تستخدم الجلفانوميتر. في أجهزة القياس الرقمية، تستخدم مجموعة من الدارات الإلكترونية والقراءة الرقمية، وهي أكثر حساسية من تلك التي للجلفانوميتر ومؤشره اللذين استبدلا. وهي أقل تأثيرًا في الدارة موضع القياس. عند قياس جهد dc، فإنّ مقاومة جهاز القياس الرقمي كبيرة جدًّا؛ تتراوح بين 10 إلى $100\ M\Omega$ $(10^7\text{–}10^8\ \Omega)$

إنّ هذه المقاومة الداخلية لا تتغير بشكلٍ ملحوظ عندما يتمّ اختيار تدريجات مختلفة للجهد (كما يحدث في أجهزة القياس ذات المؤشر).

إنّ جهاز القياس الرقمي الذي له مثل هذه المقاومة الداخلية سوف يسحب تيارًا قليلًا عند وصله بين طرفي عنصر دارة حتى لو كانت مقاومته $1\text{-M}\Omega$. تُعدّ دقة جهاز القياس الرقمي استثنائية، لأنّها غالبًا ما تكون جزءًا من 10^4 $(= 0.01\%)$ أو أفضل من ذلك. هذه الدقة في القياس ليست تمامًا كصحة القراءة. إنّ جهاز القياس الدقيق الذي مقاومته الداخلية $10^8\ \Omega$ سوف لن يعطي نتائج صحيحة إذا استخدم لقياس الجهد بين طرفي مقاوم مقاومته $10^8\ \Omega$، في مثل هذه الحالة، من الضروري القيام بحسابات كتلك التي في (المثال 19-15). كان الهدف الرئيس لهذا البند بيان أنّه حينما يتمّ عمل قياس على دارة، فإنّنا نؤثّر إلى حدٍّ ما في تلك الدارة (تذكر المثال 19-15). وهذا صحيح أيضًا بالنسبة إلى أنواع أخرى من القياس: عندما نقوم بعمل قياس على نظامٍ ما، فإنّنا نؤثر بطريقةٍ ما فيه. على سبيل المثال، جهاز قياس درجة الحرارة له حرارة نوعية معينة. لذا، فعند استخدامه لقياس درجة حرارةٍ ما، فإنّه قد يتبادل الحرارة مع النظام، وبالتالي يغير حرارته (عادة بمقدار ضئيل فقط). قد يكون ضروريًا القيام بإجراء أي تصحيحات مطلوبة، كما بينا في (المثال 19-15) .

ملخص

يُسَمّى الجهازُ الذي يحوّل أيّ نوع من الطاقة إلى طاقة كهربائية مصدرًا للقوّة الدافعة الكهربائية (**emf**). تتصرف البطاريّة **كمصدر** للقوّة الدافعة الكهربائية موصول على التوالي مع **مقاومة داخلية**. الـ emf هي الفرق في الجهد الذي يحدد بواسطة التفاعلات الكيميائية التي تحدث في البطارية. وتساوي الجهد الطرفي عندما لا يتدفق التيار من البطارية. عندما يتدفق التيار من البطارية، فإنّ جهدها الطرفي أقلّ من قوتها الدافعة الكهربائية بمقدار يساوي الهبوط في الجهد (Ir) بين طرفي المقاومة الداخلية.

عند وصل المقاومات على **التوالي** (طرفًا بطرفٍ في مسارٍ خطّيٍّ واحد)، فإنّ المقاومة المكافئة تساوي مجموع المقاومات منفردة:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots \qquad (3\text{-}19)$$

أكبر من أيّ من المقاومات R_{eq} في مجموعة التوالي، تكون عند وصل المقاومات على التوازي، فإنّ مقلوب المقاومة المكافئة يساوي مجموع مقلوب المقاومات منفردة.

في حالة الوصل على **التوازي**، تكون المقاومة المكافئة أقلّ من أيّ من المقاومات منفردة.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots \qquad (4\text{-}19)$$

تستخدم **قاعدتا كيرشوف** في تحديد التيارات والجهود في الدارات الكهربائية. تستند **قاعدة كيرشوف** للعقدة إلى حفظ الشحنة الكهربائية، وتنصّ على أنّ مجموع التيارات كلّها التي تدخل إلى أيّ عقدة يساوي مجموع التيارات كلّها التي تغادر تلك العقدة. أمّا القاعدة الثانية، أو **قاعدة العروة**، فتستند إلى قانون حفظ الطاقة، وتنصّ على أنّ المجموع الجبري للتغيرات في الجهد حول مسار مغلق لدارة يجب أن يساوي صفرًا.

عند وصل المكثفات على **التوازي**، فإنّ السعة المكافئة تساوي مجموع السعات منفردة:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots \qquad (5\text{-}19)$$

عند وصل المكثّفات على التوالي، فإنّ مقلوب السعة المكافئة يساوي مجموع مقلوب المكثفات منفردة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdot \qquad (6\text{-}19)$$

إذا وصلت دارة RC تحتوي على مقاومة R موصولة على التوالي مع مواسع C، إلى مصدر (dc) للقوة الدافعة الكهربائية، فإنّ الجهد بين طرفي المكثف يزداد تدريجيًا مع مرور الزمن الذي يميز ***بثابت الزمن***.

$$\tau = RC \qquad (7\text{-}19)$$

وهذا هو الزمن الذي يحتاج إليه الجهد حتى يصل إلى 63% من قيمته القصوى. تفريغ المكثف خلال المقاومة يميز بثابت الزمن نفسه: خلال الزمن $\tau = RC$ يهبط الجهد بين طرفي المكثف إلى 37% من قيمته الأصلية.

تنتج الصدمات الكهربائية من مرور تيار كهربائي خلال الجسم. لتجنب الصدمات: يجب ألّا يصبح الجسم جزءًا من دارة كاملة عن طريق السماح لأطرافه المختلفة بلمس أجسام عند جهود مختلفة. عمومًا، تنتج الصدمات الكهربائية عندما يلامس أحد أطراف الجسم الأرض، ويلامس طرف آخر جهدا كهربائيًا مرتفعًا.

[* يقيس **الأميتر** التيار. يتكون الأميتر ذو المؤشر من جلفانوميتر موصول على التوازي مع مقاوم يجزىء التيار ويمر خلاله أغلب التيار. يتكون الفولتميتر ذو المؤشر من جلفانوميتر ومقاوم توالٍ. يدخل الأميتر مباشرة إلى الدارة المطلوب قياس التيار المار فيها. يتم وصل الفولتميتر خارجيًا وعلى التوازي مع العنصر الذي يراد قياس فرق الجهد بين طرفيه. المقاومة الداخلية لأجهزة القياس الرقمية أكبر من تلك التي لأجهزة القياس ذات المؤشر، كما أنّ تأثيرها في الدارة أقلّ.

أسئلة

1. وضّح لماذا تقف الطيور على خطوط الكهرباء دون خطر عليها، ولكن إذا أسندت سلّمًا فلزيًا إلى أحد هذه الخطوط وصعدت عليه لجلب طائرة ورقية علقت بخط الكهرباء، فسيكون هذا خطيرًا جدًا.
2. ناقش حسنات وعيوب إضاءة شجرة عيد الميلاد بالوصل على التوازي مقابل الموصولة على التوالي.
3. إذا كان كلّ ما لديك هو خط جهد 120 V، فهل من الممكن إنارة عديد من المصابيح كل منها 6-V دون أن تحترق؟ كيف؟
4. مصباحان موصولان على التوالي، مقاومة أحدهما R_1 والآخر R_2 $(R_1 < R_2)$. أيهما أشدّ إضاءة؟ ماذا يحصل إذا وصلا على التوازي؟ وضّحْ إجابتك.

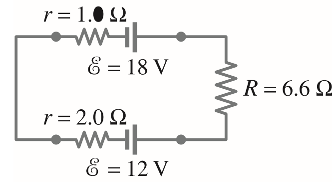
5. في أغلب الأحيان، تكون مخارج الكهرباء المنزلية ثنائية. هل هي موصولة على التوالي أم على التوازي؟ كيف تعرف؟

6. مصباحان متماثلان وبطاريتان متماثلتان. كيف يمكن ترتيب المصباحين والبطاريتين في دارة للحصول على أقصى قيمة ممكنة للقدرة الكلية الناتجة؟ (افرض أنّ المقاومة الداخلية للبطاريتين مهملة).

7. إذا وُصلت مقاومتان متماثلتان على التوالي إلى بطارية، فهل القدرة التي تزودها البطارية أكثر أم أقلّ من القدرة التي تزودها عند وصل إحدى المقاومتين فقط؟ وضح إجابتك.

8. قدرة مصباح كهربائي وحيد مضيء في غرفتك 60W. كيف تتغير المقاومة الكلية للدارة الكهربائية لغرفتك عندما تشغل مصباحًا إضافيًا قدرته 100W؟

9. عندما تطبق قاعدة كيرشوف للعروة (كما في الشكل 19-35) هل إشارة (أو اتجاه) القوة الدافعة الكهربائية emf للبطارية تعتمد على اتجاه التيار خلال البطارية؟ ماذا عن الجهد الطرفي؟



الشكل 19-35
(السؤال 9).

10. أُعطيت الدارة الموضحة في (الشكل 19-36). استخدام الكلمات "يزداد"أو "يقلّ" أو "يبقى كما هو" لتكمل العبارات التالية:

(أ) إذا زادت R_7، فإنّ الفرق في الجهد بين A و E ________.
افترض عدم وجود مقاومة في A، و $\mathscr{E}$.

(ب) إذا زادت R_7، فإنّ الفرق في الجهد بين A و E ______. افترض وجود مقاومة في A، و $\mathscr{E}$

(جـ) إذا زادت R_7، فإنّ الهبوط في الجهد بين طرفي R_4 ________

(د) إذا قلّت R_2، فإنّ التيار خلال R_1 ________

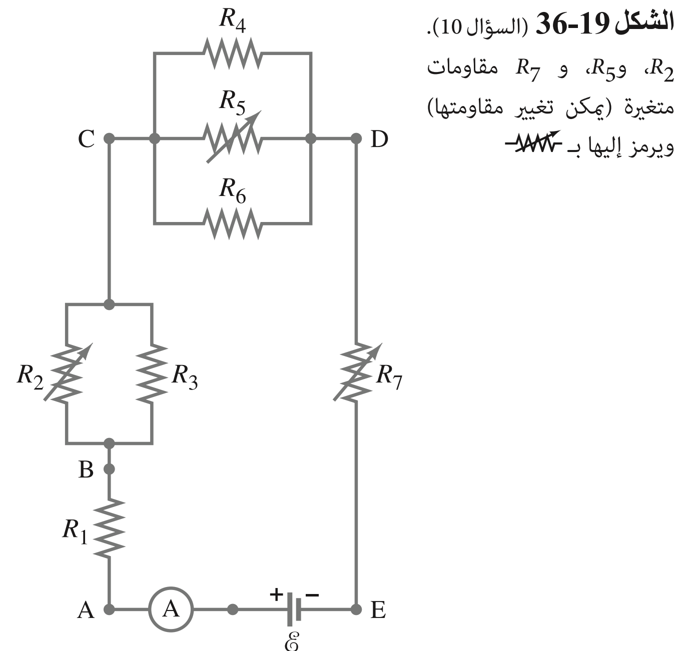
(هـ) إذا قلّت R_2، فإنّ التيار خلال R_6 ________

(و) إذا قلّت R_2، فإنّ التيار خلال R_3 ________

(ز) إذا زادت R_5، فإنّ الهبوط في الجهد بين طرفي R_2 ________

(ح) إذا زادت R_5، فإنّ الهبوط في الجهد بين طرفي R_4 ________

(ط) إذا زادت R_2 ، و R_5، و R_7 فإنّ ($\mathscr{E}$ r=0) ________



الشكل 19-36 (السؤال 10).
R_2، وR_5 و R_7 مقاومات متغيرة (يمكن تغيير مقاومتها) ويرمز إليها بـ

11. ما استعمالات وصل البطاريات على التوالي؟ وما استعمالات وصلها على التوازي؟ هل هناك مشكلة في كلّ حالة من الحالتين إذا كانت البطاريات متماثلة تقريبًا أم أنّ هذا لايعدّ مشكلة؟

12. هل يمكن للجهد الطرفي لبطارية أن يتجاوز قوتها الدافعة الكهربائية؟ وضح إجابتك.

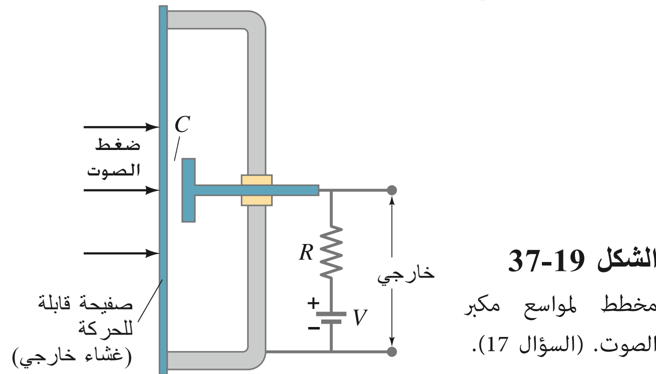
13. وضح بالتفصيل كيفية قياس المقاومة الداخلية لبطارية؟

14. قارن وناقش الصيغ التي للمقاومات وللمواسعات عند وصلها على كلّ من التوالي والتوازي.

15. افرض أنّ ثلاثة مواسعات متماثلة قد وُصلت إلى بطارية. هل يكون تخزينها للطاقة أكثر عند وصلها على التوالي أم على التوازي؟

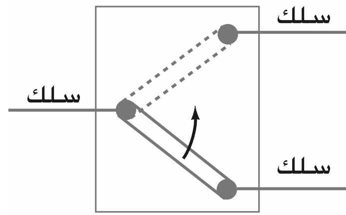
16. لماذا يُعدّ تشغيل أداة كهربائية أكثر خطورة عندما تقف خارجًا حافي القدمين من تشغيلها وأنت في الداخل تنتعل حذاء سميكا؟

17. يمثل (الشكل 19-37)مخططًا لمواسع (أو مكثف) مكبر الصوت. إن تغير ضغط الهواء في موجة صوتية يجعل أحد لوحي المكثف C يتحرك ذهابًا وإيابًا. وضح كيف ينتج تيار له التردد نفسه الذي لموجة الصوت.



الشكل 19-37
مخطط لمواسع مكبر الصوت. (السؤال 17).

18. صمّم دارة بحيث يمكن استعمال مفتاحين مختلفين من النوع الموضح في (الشكل 19-38) لتشغيل مصباح الكهرباء نفسه من جهتين متقابلتين في غرفة.



الشكل 19-38
(السؤال 18).

19. في دارة RC، يتدفق التيار من البطارية حتى يشحن المكثف بشكل كامل. هل الطاقة الكلية التي تزود بواسطة البطارية تساوي الطاقة الكلية التي تخزن في المكثف؟ إذا كانت الإجابة لا، فأين تذهب الطاقة الإضافية؟

* 20. ما الفرق الرئيس بين الفولتميتر ذي المؤشر والأميتر ذي المؤشر؟

* 21. ماذا يحدث إذا استخدمت الأميتر بشكل غير صحيح حيثما تحتاج إلى استخدام الفولتميتر؟

* 22. وضّح لماذا يجب أن تكون مقاومة الأميتر المثالي صفرًا، ومقاومة الفولتميتر المثالي لا نهائية.

* 23. الفولتميتر الموصول بين طرفي مقاومة تكون قراءته دائمًا أقلّ من الجهد الحقيقي بين طرفي المقاومة عندما لا يكون الفولتميتر موصولاً؟ فسّر ذلك.

* 24. يحتاج مصباح جيب يعمل بواسطة بطاريات صغيرة إلى بطارية 1.5 V. تتوهج فتيلة المصباح بالكاد. ولكن عند إخراج البطارية وفحصها بواسطة فولتميتر، فإنه يسجل 1.5 V. كيف تفسّر ذلك؟

مسائل

1-19 emf والجهد الطرفي

1. (I) احسب الجهد الطرفي لبطارية مقاومتها الداخلية 0.900 Ω، وقوّتها الدافعة الكهربائية 8.50 V عند وصل البطارية على التوالي مع: (أ) مقاومة 81.0 Ω . (ب) مقاومة 810 Ω.

2. (I) أربع خلايا، كلٌّ منها 1.5 V موصولة على التوالي مع مصباح كهربائي. إذا كان التيار الناتج 0.45A، فما المقاومة الداخلية لكلّ خلية؟ افرض أنّها متماثلة، واهمل مقاومة الأسلاك.

3. (II) ما المقاومة الداخلية لبطارية السيارة (12.0 V) التي يهبط جهدها الطرفي إلى 8.4 V عندما يسحب جهاز تشغيل الحركة 75A؟ ما مقاومة الجهاز؟

4. (II) يمكن فحص خلية جافة (1.5 V) عن طريق وصلها مع أميتر مقاومته صغيرة، ويجب أن تكون قادرة على تزويد تيار شدته 22A على الأقل. ما المقاومة الداخلية للخلية في هذه الحالة؟ افرض أنها أكبر بكثير من تلك التي للأميتر.

2-19 وصل المقاومات على كلّ من التوالي والتوازي

في هذه المسائل، اهمل المقاومة الداخلية للبطارية ما لم تُشِر المسألة إليها.

5. (I) أربعة مصابيح، مقاومة كلّ منها 240 Ω موصولة على التوالي. ما المقاومة الكلية للدارة؟ ما مقاومة المصابيح إذا كانت موصولة على التوازي؟

6. (I) ثلاثة مصابيح، مقاومة كلّ منها 45 Ω موصولة على التوالي مع ثلاثة مصابيح أخرى مقاومة كلّ منها 75 Ω. (أ) ما المقاومة الكلية للدارة؟ (ب) ما مقاومة المصابيح الستة إذا كانت موصولة على التوازي؟

7. (I) المقاومتان 650 Ω، و 2200 Ω موصولتان على التوالي مع بطارية 12 V. ما الفرق في الجهد بين طرفي المقاومة 2200 Ω؟

8. (*I*) إذا كان لديك مقاومتان فقط: 25 Ω و 35 Ω، فسجّل القيم المحتملة كلها للمقاومة التي يمكن الحصول عليها.

9. (I) افرض أنّ لديك المقاومات التالية: 680Ω، 940Ω و 1.20-$k\Omega$ ما أكبر و أصغر مقاومة يمكنك الحصول عليهما باستعمال هذه المقاومات؟

10. (II) افرض أنّ لديك بطارية 6.0 V وتريد تطبيق جهد 4.0 V فقط. أُعطيت عددًا غير محدود من مقاومات 1.0 Ω، كيف يمكنك وصلها لكي تعمل "مجزىء جهد" ينتج 4.0 V من جهد البطارية البالغ 6.0 V؟

11. (II) ثلاث مقاومات، قيمة كلّ منها 240Ω . يمكن وصلها مع بعضها بأربعة طرق مختلفة، لعمل مجموعات من دارات موصولة على التوالي و/ أو التوازي. ما هذه الطرق الأربعة؟ وما المقاومة الكلية في كلّ حالة؟

12. (II) بطارية قوتها الدافعة الكهربائية 12.0 V، وجهدها الطرفي 11.8 V. عند وصلها في دارة مع مصباحين قدرة كلّ منهما 3.0W (عند 12.0 V) وموصولين على التوازي. ما المقاومة الداخلية للبطارية؟

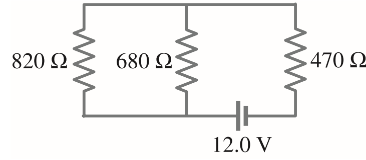
13. (II) ثمانية مصابيح متماثلة موصولة على التوالي بين طرفي خط جهد 110 V. (أ) ما الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مصباح؟ (ب) إذا كان التيار 0.50A، ما مقاومة كلّ منها؟ وما القدرة المستنفدة في كلّ مصباح؟

14. (II) ثمانية مصابيح موصولة على التوازي مع مصدر 110 V عن طريق سلكين طويلين مقاومتهما الكلية 1.6 Ω. إذا تدفق تيار شدته 240mA خلال كلّ منها، فما مقاومة كلّ مصباح؟ وما نسبة ما يفقد من القدرة الكلية خلال السلكين؟

15. (II) تضيء ثمانية مصابيح شجرة عيد ميلاد موصولة مع بعضها على التوالي ومع مصدر 110 V. إذا كانت قدرة كلّ مصباح 7.0-W، فما مقاومة كلّ واحد منها؟

16. (II) بالمعاينة الدقيقة لدارة كهربائية، تبين أنّ مقاومة 480 Ω كانت قد لُحِمَت بشكل غير مقصود في مكان يحتاج فيه إلى مقاومة 320 Ω . كيف يمكن تقويم هذا الخطأ دون إزالة أيّ شيء من الدارة الموجودة؟

17. (II) حدّد: (أ) المقاومة المكافئة للدارة المبينة في (الشكل 19-39). ب) الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مقاومة.

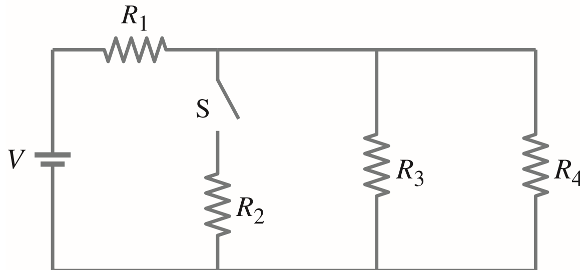


الشكل 19-39
(المسألة 17).

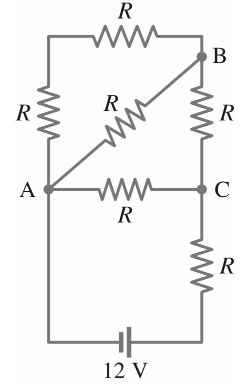
18. (II) مصباح قدرته 75W عند 110 V موصول على التوازي مع مصباح آخر قدرته 40W عند 110 V. ما المقاومة المكافئة؟

19. (III) تأمل شبكة المقاومات المبينة في (الشكل 19-40): (أ) ماذا يحدث للجهد بين طرفي كلّ مقاومة عند إغلاق المفتاح s؟ (ب) ماذا يحدث للتيار خلال كلّ مقاومة عند إغلاق المفتاح؟ (جـ) ماذا يحدث للقدرة التي تنتجها البطارية عند إغلاق المفتاح؟ (د) افرض أنّ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 125\ \Omega$، و V=22 V. حدّد التيار خلال كلّ مقاومة قبل إغلاق المفتاح وبعد إغلاقه. هل تنبؤاتك الكيفية مؤكدة؟

الشكل 19-40 (المسألة 19)

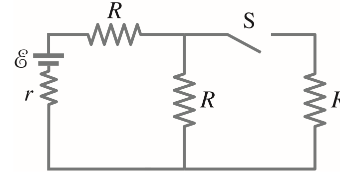


.20 (III) ما المقاومة المكافئة للدارة الموصولة مع البطارية التي في (الشكل 19- 41)؟ إذا علمت أنّ قيمة كلّ مقاومة $R = 2.8k\ \Omega$.



الشكل 19-41
(المسألة 20).

.21 (III) ثلاث مقاومات متساوية (R) موصولة مع بطارية كما في (الشكل 19-42) . ماذا يحدث: (أ) للهبوط في الجهد بين طرفي كلّ مقاومة؟ (ب) للتيار المتدفق خلال كلّ مقاومة؟ (جـ) للجهد الطرفي للبطارية عندما يفتح المفتاح s بعد أن كان مغلقًا لفترة زمنية طويلة؟ (د) إذا كانت القوة الدافعة الكهربائية للبطارية تساوي 15.0 V؟ وما جهدها الطرفي عند إغلاق المفتاح إذا كانت مقاومتها الداخلية $0.50\ \Omega$ و $R = 5.50\ \Omega$؟ وما جهدها الطرفي عندما يفتح المفتاح؟

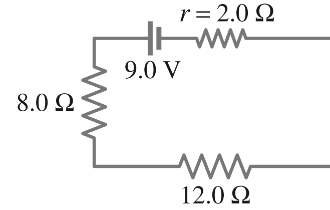


الشكل 19-42 (المسألة 21)

.22 (III) مقاومتان، إحداهما $2.8\,k\Omega$ والأخرى $2.1\,k\Omega$ موصولتان على التوازي. وصلت هذه على التوالي مع مقاومة قيمتها $1.8\,k\ \Omega$. إذا كانت قدرة كلّ مقاومة $\frac{1}{2}\ W$ (أقصى قيمة دون حدوث تسخين أكثر مما ينبغي). فما القيمة القصوى للجهد الذي يمكن تطبيقه بين طرفي الشبكة ككلّ؟

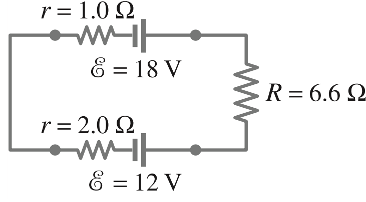
3-19 قاعدتا كيرشوف

.23 (I) احسب التيار في الدارة التي (للشكل 19-34) . وبيّن أنّ مجموع التغيرات كلها في الجهد حول الدارة يساوي صفرًا.



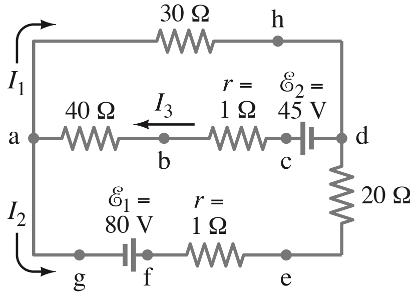
الشكل 19-34 (المسألة 23)

.24 (II) حدّد الجهد الطرفي لكلّ بطارية في (الشكل 19-44) .



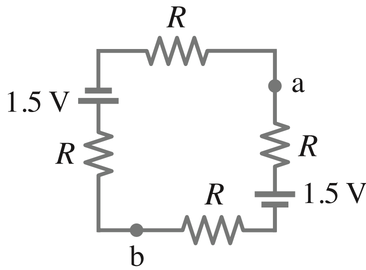
الشكل 19-44 (المسألة 24)

.25 (II) (أ) ما الفرق في الجهد بين النقطتين a. و b في الشكل19-45 (الدارة نفسها التي في (الشكل 19-13، المثال 19-8)؟ (ب) ما الجهد الطرفي لكلّ بطارية؟



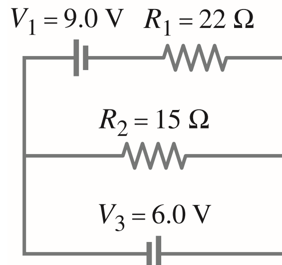
الشكل 19-45 (المسألة 25)

.26 (II) للدارة المبينة في (الشكل 19-46) . جدِ الفرق في الجهد بين النقطتين a. و b. إذا علمت أنّ قيمة كلّ مقاومة $R = 75\ \Omega$ وكلّ بطارية 1.5V.



الشكل 19-46 (المسألة 26)

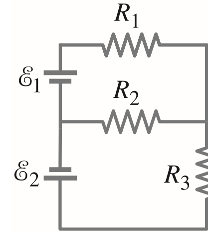
.27 (II) حدّد مقدار التيار المار في كلّ مقاومة في (الشكل19-47) واتجاهه.



الشكل 19-47 (المسألة 27 و 28)

.28 (II) أعد حلّ (المسألة 27) . مفترضًا أنّ كلّ بطارية لها مقاومة داخلية $r = 1.2\Omega$.

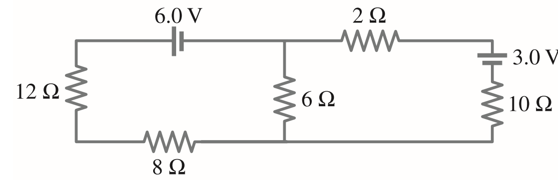
29. (II) حـدّد مقـدار التيـار المار فـي كلّ مقاومة في (الشـكل 19 - 48)واتجاهـه. القـوى الدافعـة الكهربائية للبطاريـات $\mathscr{E}_1 = 9.0\ V$، و$\mathscr{E}_2 = 12.0\ V$ وقيم المقاومات $R_1 = 25\Omega$، و $R_2 = 18\Omega$، و$R_3 = 35\Omega$.



الشكل 19-48 (المسألتان 29 و 30).

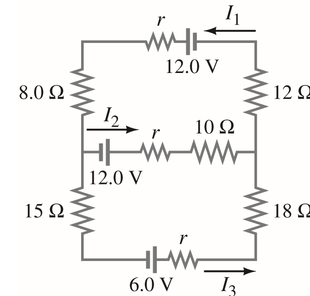
30. (II) أعد حلّ (المسألة 29) ، مفترضًا أنّ كلّ بطارية لها مقاومة داخلية $r = 1.0\ \Omega$.

31. (*II*) احسب التيار المار في كلّ مقاومة في (الشكل 19-49) .



الشكل 19 - 49 (مسألة 31).

32. (III) (أ) احسب التيارات I_1، وI_2، وI_3 المبينة في (الشكل19 - 50). افرض أنّ المقاومة الداخلية لكلّ بطارية $r = 1.0\ \Omega$. (ب) ما الجهد الطرفيّ للبطارية 6.0 V؟

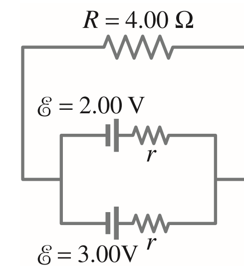


الشكل 19-50 (المسألتان 32 و 33).

33. (III) كم شدّة التيار I_1 في (الشكل 19 - 50) إذا قصرت المقاومة 12؟ افرض أنّ $r = 1.0\Omega$.

* 4-19 تجميع Emfs، شحن البطارية

* **34.** (II) بطاريتان. القوة الدافعة الكهربائية لإحداهما 2.00 V وللأخرى 3.00 V. موصولتان كما هو مبين في الشكل 19 - 51. إذا كانت المقاومة الداخلية لكلّ منهما $r = 0.100\Omega$، و $R = 4.00\ \Omega$. فما الفرق في الجهد بين طرفي المقاومة R؟



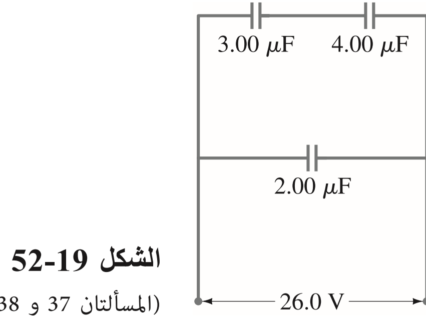
الشكل 19-51 (المسألة 34).

5-19 وصل المكثّفات على كلّ من التوالي والتوازي

35. (I) (أ) ستة مواسعات. مواسعة كلّ منها $4.7\text{-}\mu F$، وموصولة على التوازي. ما المكثفة المكافئة؟ (ب) ما مواسعتها المكافئة إذا وصلت على التوالي؟

36. (I) لديـك ثلاثـة مواسـعات سـعاتها $3200\ pF$، و $7500\ pF$، و$0.0100\ \mu F$. ما الحدّان الأعلى والأدنى للسـعة التي يمكنك تكوينها من هذه المكثفات؟ كيف تقوم بعمل التوصيل في كلّ حالة؟

37. (I) مواسعان. أحدهما $3.00\text{-}\mu F$ والآخر $4.00\text{-}\mu F$ موصولان على التوالي. وهما موصولان على التوازي مع مواسع آخر انظر إلى (الشكل 19-52). ما هي السعة المكافئة؟



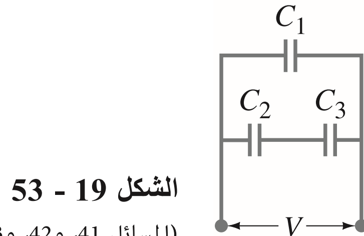
الشكل 19-52 (المسألتان 37 و 38).

38. (II) إذا طُبِّق فرق الجهد 26.0 V بين طرفي الشبكة التي في (الشكل 19-52) . فاحسب الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مواسع.

39. (II) يُراد تقليل سعة جزء من دارة من 4800pF إلى 2900pF. ما السعة التي يجب إضافتها إلى الدارة ليحدث هذا التأثير دون إزالة عناصر الدارة الموجودة؟ هل يجب قطع أيّ من التوصيلات الموجودة خلال هذه العملية؟

40. (II) بُنيت دارة كهربائية عن غير قصد باستعمال مواسع $5.0\text{-}\mu F$ بدلا من القيمة المطلوبة $16\text{-}\mu F$. دون إزالة المكثف $5.0\text{-}\mu F$، ما الذي يمكن أن يضيفه العامل الفني لتصحيح هذه الدارة؟

41. (II) جد السعة المكافئة للدارة المبينة في الشكل 19-53.



الشكل 19 - 53 (المسائل 41، و42، و43، و 44).

* **42.** (II) في (الشكل 19 - 53) ، إذا كان $C_1 = C_2 = 2C_3 = 22.6\ \mu F$ فكم كمية الشحنة المختزنة في كلّ مواسع عندما $V = 45.0\ V$

* **43.** (II) في (الشكل 19 - 53) افرض أنّ $C_1 = C_2 = C_3 = 16.0\ \mu F$ إذا كانت الشحنة على المكثف C_2 هي $Q_2 = 24.0\ \mu C$، فاحسب: (أ)الشحنة على كلّ مواسع من المكثفات الأخرى. (ب) الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مواسع. (جـ) الفرق في الجهد V بين طرفي كامل المجموعة.

* **44.** (II) فـي (الشكل 19 - 53) . افــرض أنّ $V = 78V$، و $C_1 = C_2 = C_3 = 7.2\ \mu F$ كم كمية الطاقة المختزنة في شبكة المكثفات؟

* **45.** (II) مواسعان. أحدهما $0.40\text{-}\mu F$ والآخر $0.60\text{-}\mu F$ موصولان على التوالي مع بطارية 9.0V. احسب: (أ) الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مواسع. (ب) الشحنة على كلّ مواسع. (جـ) أعد الجزأين (أ) و (ب) مفترضًا أنّ المكثفين موصولان على التوازي.

46. (II) ثلاثة ألواح موصلة مساحة كلّ منها A، وموصولة كما هو مبين في (الشكل 19 - 54). (أ) هل المكثفان اللذان تشكلا موصولان على التوالي أم على التوازي؟ (ب) حدّد المكثفة C كدالة في d_1، d_2 و A. افرض أنّ d_1+d_2 صغيرة جدّا مقارنة مع أبعاد اللوحين.



الشكل 19 - 52

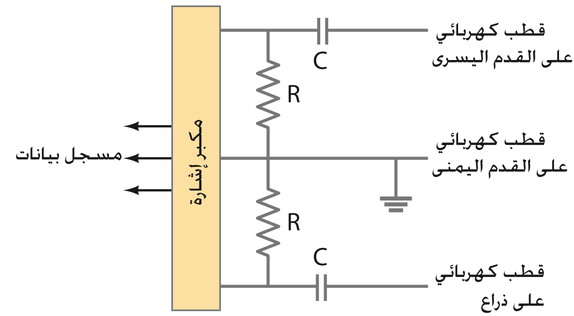
(المسألتان 37 و 38).

47. (II) تحتوي دارة على مواسع واحد مواسعته $250pF$ موصول بين طرفي بطارية. يُراد تخزين ثلاثة أضعاف الطاقة في مجموعة مكونة من مواسعين عن طريق إضافة مواسع آخر إلى المكثف الموجود في الدارة. كيف يمكنك وصله؟ وكم يجب أن تكون قيمته؟

48. (III) مواسع $185pF$ موصول على التوالي مع مواسع آخر سعته مجهولة. تمّ وصلهما إلى بطارية قوتها الدافعة الكهربائية 25.0V. إذا خزّن المكثف $185pF$ على لوحيه شحنة مقدارها $125pC$، فما هي السعة المجهولة؟

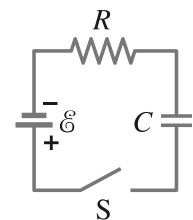
6-19 دارات RC

49. (I) في أغلب الأحيان، توصل أجهزة تخطيط القلب الكهربائية كما هو مبين في (الشكل 19 - 55) . أطراف التوصيل في الجهاز يُقال إنّها مرتبطةٌ سعويّا. يسمح ثابت الزمن العادي $3.0s$ بتغيرات سريعة في الجهد يمكن تسجيلها بدقة. إذا كان $C = 3.0\mu F$، فكم يجب أن تكون قيمة R؟ [مساعدة: اعتبر كلّ طرف كدارة منفصلة].



الشكل 19-55 المسألة 49.

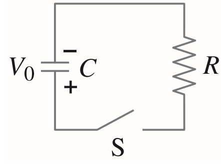
50. (II) في الشكل 19 - 56 (الشكل 19 - 20 (أ) نفسه) المقاومة الكلية تساوي $15.0k$ والقوة الدافعة للبطارية تساوي 24.0V. إذا تم قياس ثابت الزمن فكان $3.50\mu S$ فاحسب: (أ) المكثفة الكلية للدارة. (ب) الزمن اللازم حتى يصل فرق الجهد بين طرفي المقاومة إلى 16.0V بعد إغلاق المفتاح.



الشكل 19 - 56

(المسألة 50)

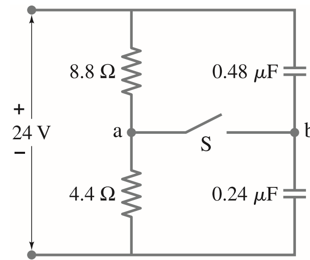
51. (II) في دارة Rc المبينة في الشكل 19 - 57 (الشكل 19 – 21 (أ)) نفسه $R=6.7k\ \Omega$ و $C = 3.0\,\mu F$. عند اللحظة $t = 0$ عندما يتم إغلاق المفتاح. يكون الفرق في الجهد بين طرفي المكثف V_0. ما الفترة الزمنية التي يحتاج إليها المكثف حتى يفرغ إلى 1.0% من جهده الأصلي؟



الشكل 19 - 57

(المسألة 51)

52. (III) مقاومتان ومواسعتان غير مشحونين. تم ترتيبها كما هو مبين في (الشكل 19-58). ثم طُبّق فرق جهد مقداره 24V بين طرفي المجموعة كما هو موضح. (أ). كم الجهد عند النقطة a عندما لا يكون المفتاح s مغلقًا؟ (افرض أنّ V=0 عند الطرف السالب للمصدر). (ب) كم الجهد عند النقطة b عندما لا يكون المفتاح مغلقًا؟ (جـ) عندما يُغلق المفتاح، كم الجهد النهائي للنقطة b؟ (د) كم كمية الشحنة التي تتدفق خلال المفتاح s بعد إغلاقه؟



الشكل 19 - 58

(المسألة 52)

* 8-19 الأميتر والفولتميتر

53. * (I) ما مقاومة فولتميتر على التدريج 250V إذا كانت حساسيته تساوي $30,000V/\ \Omega$؟

54. * (I) حساسية أميتر $20,000V/\ \Omega$. ما التيار المار في الجلفانوميتر حتى ينحرف مؤشره انحرافًا كاملاً؟

55. * (II) المقاومة الداخلية لجلفانوميتر $30\ \Omega$. ينحرف مؤشره انحرافًا كاملا عند تيار شدته. صف كيف تستعمل هذا الجلفانوميتر لعمل: (أ) أميتر يقرأ تيارات لغاية 30 A. (ب) فولتميتر ينحرف مؤشره انحرافًا كاملًا عند 250V.

56. * (II) حساسية جلفانوميتر $35\ \Omega k$، ومقاومته الداخلية $20.0\ \Omega$. كيف يمكنك جعله (أ) أميترًا يقرأ 2.0A عند الانحراف الكامل لمؤشره؟ أو (ب) فولتميترًا يقرأ 1.00V عند الانحراف الكامل لمؤشره؟

57. * (II) يقرأ مللي أميتر 10mA عند الانحراف الكامل لمؤشره. يحتوي هذا الجهاز على مقاومة 0.20Ω موصولة على التوازي مع جلفانوميتر مقاومته $33\ \Omega$. كيف يمكنك تحويل هذا الأميتر إلى فولتميتر يقرأ 10V عند الانحراف الكامل لمؤشره دون نزع الأميتر؟ كم ستكون حساسية هذا الفولتميتر؟ $(\Omega/\ V)$

58. * (II) بطارية (V45) مقاومتها الداخلية مهملة، موصولة مع مقاومتي توالٍ: إحداهما $38k\ \Omega$ والأخرى $27k\ \Omega$. ما القراءة التي يعطيها أميتر مقاومته الداخلية $95k\ \Omega$، عندما يستخدم لقياس الفرق في الجهد بين طرفي كلّ مقاومة؟ ما النسبة المئوية للخطأ في كلّ حالة بسبب مقاومة الأميتر؟

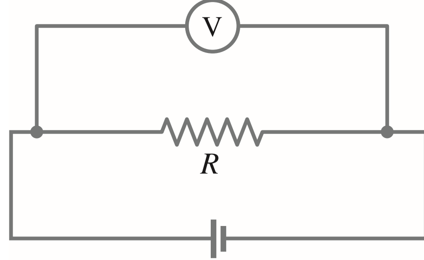
59. * (II) المقاومة الداخلية لأميتر $63\ \Omega$، يقرأ تيارًا شدته 5.25mA عند وصله في دارة تحتوي على بطارية ومقاومتين موصولتين على التوالي، إحداهما $750\ \Omega$ والأخرى $480\ \Omega$. ما شدة التيار الحقيقية في غياب الأميتر؟

* **60** (II) القوة الدافعة لبطارية $\mathscr{E} = 12.0\text{ V}$ ومقاومتها الداخلية $r = 1.0$ موصولة مع مقاومتي توالٍ كلّ واحدة منها $9.0k\ \Omega$. استخدم أميترًا مقاومته الداخلية 0.50Ω لقياس التيار. واستخدم في الوقت نفسه فولتميترًا مقاومته الداخلية $15k\ \Omega$ لقياس الفرق في الجهد بين طرفي إحدى $9.0\text{-k}\Omega$ هاتين المقاومتين في الدارة. ما قراءة كلٍّ من الأميتر والفولتميتر؟

* **61** (III) مقاومتان، كلٌّ واحدةٍ منهما $9.4k\ \Omega$ وصلتا على التوالي مع بطارية. فولتميتر حساسيته $1000\ \Omega/\text{V}$ وتدريجه 3.0V يقرأ 2.0V عند وصله بين طرفي أيٍّ من المقاومتين. ما القوة الدافعة الكهربائية لهذه البطارية؟ (أهمل مقاومتها الداخلية)

* **62** كم يجب أن تكون المقاومة الداخلية للفولتميتر الوارد في (المثال 19-15)لتكون نسبة الخطأ فيه أقلّ من 3%؟

* **63** عندما تكون قيمة المقاومة R في الشكل 19-59 تساوي 35Ω، فإنّ الفولتميتر الذي مقاومته كبيرة يقرأ 9.7V. إذا استعملنا مقاومة أخرى قيمتها 9.0Ω بدلًا من R، فإنّ قراءة الفولتميتر تهبط إلى 8.1V. ما القوة الدافعة الكهربائية لهذه البطارية؟ وما مقاومتها الداخلية؟



الشكل 19 - 59

(المسألة 63)

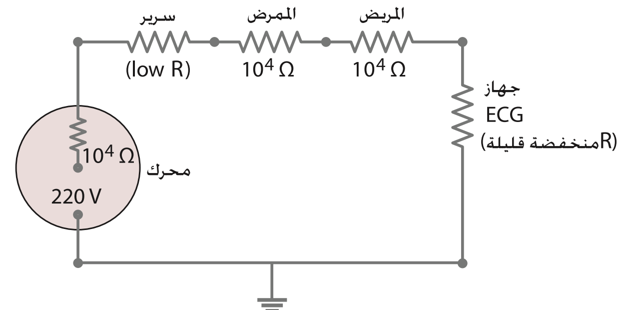
مسائل عامة

64. افرض أنّك تريد تطبيق فرق جهد مقداره 0.25-V بين نقطتين على جسد إنسان. المقاومة حوالي $2000\ \Omega$، ولديك بطارية 9.0-V فقط. كيف يمكنك توصيل مقاومة أو أكثر للحصول على الجهد المطلوب؟

65. **مصباح ثلاثي التوصيل** يمكنه إنتاج 50 W، و100 W، و150 W عند جهد 120V. يحتوي مثل هذا المصباح على فتيلتين يمكن وصلهما مع مصدر الجهد 120V بشكل منفرد أو على التوازي (أ) صف كيف يتمّ التوصيل مع الفتيلين للحصول على كلّ قدرة من القدرات الثلاث. (ب) كم يجب أن تكون مقاومة كلّ فتيل؟

66. افرض أنّك تريد تشغيل جهاز ما يبعد 95m عن مخرج كهرباء. (كلّ سلك من أسلاك توصيل جهازك إلى المصدر 120-V، مقاومته لكلّ وحدة طول تساوي $(0.0065\ \Omega/m)$. إذا سحب الجهاز تيّارًا شدته $3.0A$، كم سيكون الهبوط في الجهد بين طرفي أسلاك التوصيل؟ وكم سيكون الجهد بين طرفي الجهاز؟

67. يمكن أن تكون الكهرباء خطرًا في المستشفيات خصوصًا للمرضى الذين توصل أجسامهم مع أقطاب كهربائية كجهاز تخطيط القلب. افرض أنّ المحرك في سرير كهربائي قد وُصل مع إطار السرير نتيجة لعطل ما، وأنّ سلك توصيل إطار السرير مع الأرض مقطوع (أو أنه غير موجود أصلا). إذا لامست مرضة السرير والمريض في الوقت نفسه، فإنها تصبح موصلا، وتكتمل الدارة خلال المريض إلى الأرض خلال جهاز تخطيط القلب. وهذا مبين بشكل تخطيطي في (الشكل 19 - 60). احسب التيار المار خلال المريض.



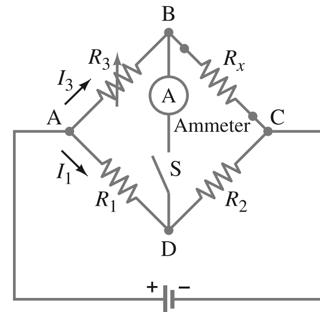
الشكل 19 - 60 (مسألة 67).

68. كم كمية الطاقة التي تستهلكها بطارية 45V في شحن مواسعين: أحدهما $0.40\text{-}\mu\text{F}$ والآخر $0.60\text{-}\mu\text{F}$ بشكل كامل عند وصلهما: (أ) على التوازي؟ (ب) على التوالي؟ وما كمية الشحنة التي تتدفق من البطارية في كلّ حالة؟

69. صُمّم منظّم نبضات قلب ليعمل بمعدّل 72 نبضة/ دقيقة باستعمال مواسع $7.5\text{-}\mu\text{F}$ في دارة RC بسيطة. ما قيمة المقاومة التي يجب أن تستخدم حتى يفصل منظّم النبضات (تفريغ المكثف) عندما يصل الجهد 63% من القيمة القصوى؟

70. افرض أنّ مقاومة جسمٍ ما تساوي 950Ω. (أ) ما شدة التيار المار خلال جسمه عندما يتصل عن غير قصد مع مصدر جهد 110V؟ (ب) إذا كان هنالك مسار بديل يتصل مع الأرض ومقاومته 45Ω. فما شدة التيار المار خلال هذا الشخص؟ (جـ) إذا كانت القيمة القصوى لشدة التيار الذي ينتجه المصدر تساوي $1.5A$، فكم شدة التيار المار خلال الشخص في الحالة (ب)؟

71. **قنطرة ويتستون** هي نوع من الدارات الكهربائية التي تُستخدم في قياس مقاومةٍ مجهولة. المقاومة المجهولة التي يُراد قياسها R_x توضع في الدارة مع مقاومات معلومة بشكلٍ دقيق وهي R_1وR_2، و R_3 (الشكل 19-61). إحدى هذه المقاومات R_3 متغيّرة، ويمكن تعديلها بحيث إنه عندما يغلق المفتاح لحظيًّا، تظهر قراءة الأميتر Ⓐ أنّ التيار المتدفّق يساوي صفرًا. (أ) جد R_x بدلالة R_1، R_2و R_3. (ب) إذا حدث اتزان قنطرة ويتستون عندما $R_1=630\ \Omega$ و $R_2=972\ \Omega$، و $R_3=42.6\Omega$. فما قيمة المقاومة المجهولة؟



الشكل 19 - 61

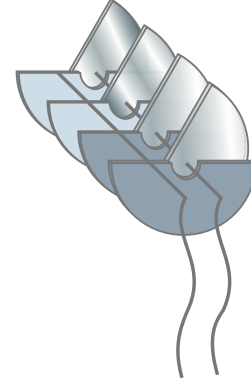
(المسألتان 71 و 72)

قنطرة ويتستون

72. قطعةٌ من سلك بلاتين مجهولة الطول، وقطرها 0.920 mm وضعت كمقاومةٍ مجهولةٍ في قنطرة ويتستون (انظر إلى المسألة 71، الشكل 19 - 61). مقاومة كلٍّ من الذراعين 1 و 2 $38.0\ \Omega$ و $46.0\ \Omega$ على الترتيب. وتحقّق الاتزان عندما R_3 تساوي $3.48\ \Omega$. كم طول سلك البلاتين؟

.73 ما قيم المكثفة الفاعلة التي يمكن الحصول عليها بتوصيل أربعة مواسعات متماثلة. ومواسعة كلٍّ منها C؟

.74 يتكوّن المكثّف المتغيّر في جهاز موالفة المذياع القديم من أربعة ألواح موصولة مع بعضها. توضع واحدًا بعد الآخر بين أربعة ألواح أخرى موصولة أيضًا مع بعضها (الشكل 19 - 62). كلُّ لوح منفصل عن اللوح المجاور له بـ 1.5 mm من الهواء. مجموعةٌ واحدةٌ من هذه الألواح يمكن أن تتحرك بحيث تتغير منطقة التداخل بين الألواح بمقدار يتراوح من $2.0\ cm^2$ إلى $9.5\ cm^2$. (أ) هل هذه المكثفات السبعة موصولة على التوالي أم على التوازي؟ (ب) حدد مدى قيم المكثفة.

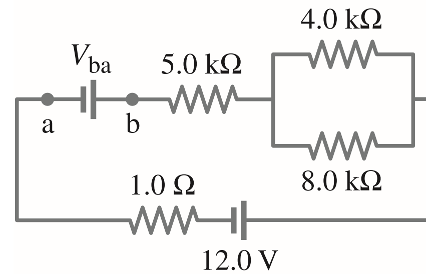


الشكل19-62
(المسألة 74)

.75 تنتج بطارية 40.8V عندما يُسحب منها تيّارٌ شدّته $7.40A$، و47.3V عندما يُسحب منها $2.20A$. ما القوة الدافعة الكهربائية لهذه البطارية؟ وما مقاومتها الداخلية؟

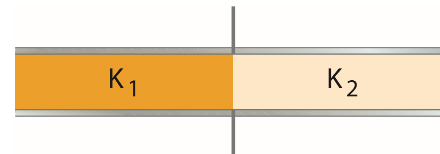
.76 كم عدد المقاومات (قيمها متساوية) التي قدرة كلّ منها $\frac{1}{2}$-W اللازم استخدامها للحصول على مقاومة مكافئة قيمتها $2.2k\ \Omega$ وقدرتها $3.5W$؟ ما قيمة كلّ مقاومة؟ وكيف يجب أن تكون موصولة؟ لا تجعل القدرة في كلّ مقاومة تزيد على $\frac{1}{2}$ W

.77 التيار المار خلال المقاومة 4.0-kΩ في الشكل 19 - 63 يساوي 3.50 mA. ما الجهد الطرفي V_{ba} للبطارية المجهولة؟ (هناك إجابتان. لماذا؟) [مساعدة: استخدم حفظ الطاقة أو قاعدتي كيرشوف].



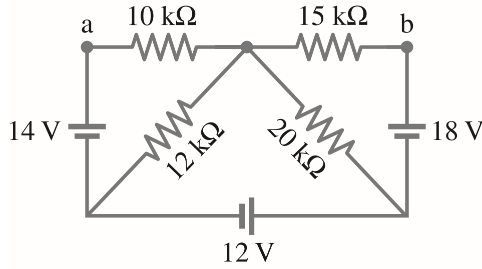
الشكل 19 - 63 (المسألة 77)

.78 مواسع هوائي متوازي اللوحين، مواسعته C_0. أُدخل لوحان عازلان حجماهما متماثلان ثابت عزل أحدهما K_1 والآخر K_2 كما في (الشكل 19-46). ما هي المكثفة الجديدة؟ [مساعدة: اعتبر ذلك مثل مواسعين موصولين مع بعضهما]



الشكل 19 - 64 (المسألة 78)

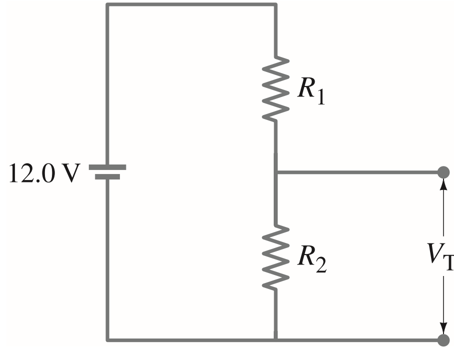
.79 للدارة المبينة في (الشكل 19 - 65). حدّد كلّا من: (أ) التيار المار خلال البطارية 14 V. (ب) الفرق في الجهد بين النقطتين a و b. V_a-V_b.



الشكل 19 - 65 (المسألة 79)

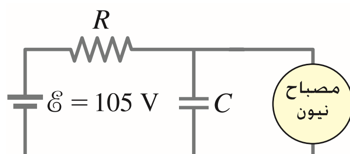
.80 خليّةٌ شمسيّةٌ، 3.0 cm. ينتج منها تيّارٌ شدّته 350 mA عند جهد 0.80 V عندما تتعرض لضوء الشمس الساطعة. يُحتاج إلى لوحة شمسية لتزويد حمل خارجي بتيار 1.0 A عند جهد 120 V. كم عدد الخلايا التي سوف تحتاج إليها لعمل هذه اللوحة؟ كم حجم اللوحة الشمسية التي ستحتاج إليها؟ كيف توصل الخلايا بعضها ببعض؟ كيف تُحسّن إنتاجيّة اللوحة الشمسية؟

.81 مردودُ الجهد الناتج من مصدر طاقة ثابتٌ، ويساوي 12.0 V تحتاج في تجربة ما إلى الجهد $V_T = 3.0\ V$. (أ) مستخدمًا مجزىء الجهد المبين في (الشكل 19 - 66). كم يجب أن تكون R_2 إذا كانت R_1 تساوي 10.0 Ω؟ (ب) كم يكون الجهد الطرفي V_T إذا وصلت حِمْلا مع الطرف 3.0 V، مفترضًا أنّ مقاومة الحِمْل 7.0Ω؟



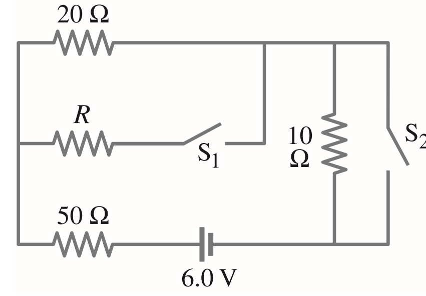
الشكل 19 - 66 (المسألة 81)

.82 تستخدم الدارة المبينة في (الشكل 19 - 67)مصباح النيون كما في (الشكل 19 - 23 أ). جهد حدّ العتبة اللازم للتوصيل في هذا المصباح يساوي V_0؛ لأنّ التيار لا يتدفق حتى يتأين غاز النيون في الأنبوب عن طريق مجال كهربائي قوي بما فيه الكفاية. حالما يُجتاز جهد العتبة، تصبح مقاومة المصباح مهملة. يخزن المكثف طاقة كهربائية يمكن أن تتحرر وتضيء المصباح. افرض أنّ $C = 0.150\ \mu F$، $R = 2.35 \times 10^6\ \Omega$، $V_0 = 90.0\ V$ و $\mathscr{E} = 105V$. (أ) مفترضًا أنّ الدارة موصولة مع مصدر القوة الدافعة الكهربائية عند اللحظة $t = 0$. فعند أيّ لحظة يحدث أول وميض للضوء؟ (ب) إذا زادت قيمة R. هل الزمن الذي وجدته في الفرع (أ) يزداد أم يقل؟ (جـ) إنّ وميض المصباح قصير جدًّا. لماذا؟ (د) وضّح ماذا يحدث بعد وميض المصباح لأوّل مرة؟



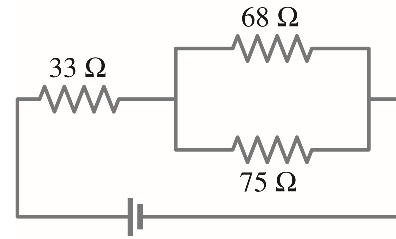
الشكل 19 - 67
(المسألة 82)

83. إن التيار المار خلال المقاومة 20 Ω في (الشكل 19 - 68) لا يتغير سواء كان المفتاحان مغلقين أو مفتوحين. استخدم هذه الفكرة لإيجاد قيمة المقاومة المجهولة R.



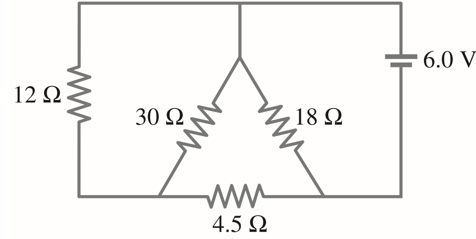
الشكل 19 - 61 (المسألة 83)

84. في الدارة المبينة في (الشكل 19 - 69). القدرة المستنفدة في المقاومة 33Ω تساوي $0.50W$. كم الفرق في الجهد بين طرفي البطارية؟



الشكل 19 - 69 (المسألة 84)

85. (أ) ما المقاومة المكافئة للدارة المبينة في (الشكل 19 - 70)؟ (ب) ما شدة التيار المار خلال المقاومة 18Ω؟ (جـ) ما شدة التيار المار خلال المقاومة 12Ω؟



الشكل 19 - 69 (المسألة 85)

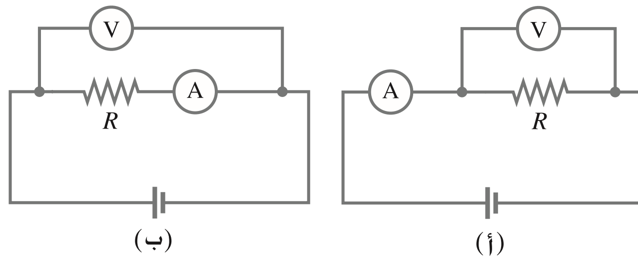
* **86.** (أ) يمكن توصيل فولتميتر وأميتر كما هو مبين في (الشكل 19 -71 أ) لقياس المقاومة R. إذا كانت قراءة الفولتميتر V وقراءة الأميتر I، فإنّ قيمة R لا تساوي V/I تمامًا؛ (كما في قانون أوم) لأنّ جزءًا من التيار يمرّ في الحقيقة خلال الفولتميتر. أثبت أنّ القيمة الحقيقية للمقاومة R تُعطى بالعلاقة

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{V} - \frac{1}{R_V}$$

حيث R_V تمثل مقاومة الفولتميتر. لاحظ أنّ $R \approx V/I$ إذا كانت $R_V \gg R$ (ب) يمكن أيضًا وصل فولتميتر وأميتر كما هو مبين في (الشكل 19- 71 ب) لقياس المقاومة R. أثبت في هذه الحالة أنّ

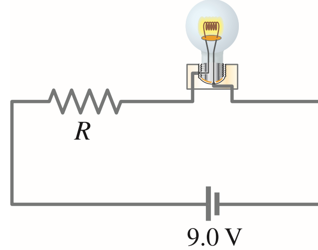
$$R = \frac{V}{I} - R_A$$

حيث V و I قراءتا الفولتميتر والأميتر، و R_A مقاومة الأميتر. لاحظ أنّ $R \approx V/I$ إذا كانت $R \gg R_A$.



الشكل 19 - 71 (المسألة 86)

87. يعمل مصباح قدرته $2.5W$ عند جهد 3.0V بواسطة بطارية 9.0V. ولكي يضيء المصباح عند الجهد والقدرة المحددتين له؛ يتمّ وصل مقاومة R على التوالي كما هو مبين في (الشكل 19 - 72). كم يجب أن تكون قيمة المقاومة؟



الشكل 19 - 72 (المسألة 87)

إجابات التمارين

(أ): (جـ) $P_R = 13.1$ W، (ب) 11.4V، (أ) $1.14A$
(د) $P_r = 0.65$ W

(ب): توالٍ مع $R_1/R_2 = 4.0$

(جـ): $41I_3 - 45 + 21I_2 - 80 = 0$

(د): $180A$. هذا التيار المار في البطاريات كبير، وقد يجعلها ساخنةً جدًّا: القدرة المستنفدة خلال البطارية الضعيفة يجب أن تكون $P = I^2r = (180\text{ A})^2(0.10\,\Omega) = 3200$ W!

(هـ): 12 kΩ

(و): سوف يشتمل الفولتميتر على مقاومة $R_{ser} = 300$ kΩ موصولة على التوالي مع الجلفانوميتر.

ينتج المغناطيس مجالًا مغناطيسيًّا وكذلك يفعل التيار الكهربائيّ، فعند مرور تيار كهربائي في سلك مستقيم، فإنّه ينتج مجالا مغناطيسيّا حوله، ويسبب ترتيب برادة الحديد باتّجاه المجال. وتكون خطوط هذا المجال حول السلك على شكل دوائر.

سنرى في هذا الفصل كيفية تعريف المجال المغناطيسيّ، وكيفية تحديد اتّجاهه، كما سنناقش أيضًا كيفية تأثير المجال الكهربائيّ بقوة في الشحنات المتحركة، وفي الأسلاك التي تحمل تيارًا كهربائيًّا، كتطبيق مفيد على تفاعل المجال المغناطيسيّ مع التيار الكهربائيّ والشحنات الكهربائيّة المتحركة.



الفصل 20

المغناطيسيّة



الشّكل 20 – 1 مغناطيس على شكل حذوة الفرس يجذب مجموعة دبابيس.

أقطاب المغناطيس

يعود تاريخ المغناطيسيّة إلى آلاف السنوات، في منطقة من مناطق آسيا تدعى ماغنيسيا وجدت فيها صخور يتجاذب بعضها مع بعض، وسميت هذه الصّخور بعد اكتشافها بالمغناطيس.

لم تُكتشف العلاقة بين المغناطيسيّة والكهرباء قبل بداية القرن التاسع عشر. إنّ الاكتشاف الحاسم بأنّ التيار الكهربائيّ يُولّد مجالًا مغناطيسيًّا كالمغناطيس فتح المجال أمام الكثير من الأجهزة العملية التي تعتمد على المغناطيسيّة ابتداءً من البوصلة وانتهاءً بالمحركات الكهربائيّة، والسّماعات، وذاكرة الحاسوب، والمولّدات الكهربائيّة.

1-20 المغناطيس والمجال المغناطيسيّ

نلاحظ جميعًا أنّ المغناطيس يجذب مشابك الورق، والمسامير، والأجسام الأخرى المصنوعة من الحديد، (الشّكل 20 – 1). أي مغناطيس، سواءً كان على شكل قضيب أو على شكل حذوة فرس له طرفان يُسَمّى كلٌّ منهما **قطبًا**. وعند هذه الأقطاب، يكون تأثير المغناطيس أكبر ما يمكن، إذا عُلّق قضيبٌ مغناطيسيٌّ من منتصفه، فإنّنا نجد أحد الأقطاب يشير دائمًا باتّجاه الشّمال. لم يعرف تمامًا متى اكتشفت هذه الظاهرة، ولكن الصينيين استخدموها في الملاحة في القرن الحادي عشر، وربّما قبل ذلك، وهذا هو مبدأ عمل البوصلة. فالبوصلة قضيبٌ مغناطيسيٌّ يُثَبَّت من مركز جاذبيته بحيث يستطيع الدوران بحرية.

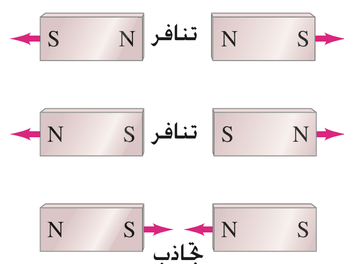
يُسَمّى القطبُ الذي يشير باتّجاه الشّمال الجغرافيّ **القطبَ الشّماليّ** للمغناطيس، أمّا القطب الآخر الذي يشير باتّجاه الجنوب الجغرافيّ فَيُسَمّى **القطب الجنوبيّ**. ومن المشاهدات المألوفة أنّه عند تقريب مغناطيسين من بعضهما؛ فإنّ كلّا منهما يؤثر بقوة في الآخر، وقد تكون هذه القوّةُ قوةَ تنافر أو قوةَ تجاذب. وعند تقريب القطب الشّماليّ من قضيب مغناطيسيّ من القطب الشّماليّ لآخر، فإنّ القوّة بينهما تكون قوة تنافر. وبالمثل، عند تقريب قطبين جنوبيين من بعضهما. ولكن عند تقريب قطب شماليّ من آخر جنوبيّ، فإنّ القوّة بينهما تكون قوة تجاذب. هذه النتائج موضحة في (الشّكل 20 – 2). وهذا يذكّرنا بالقوى بين الشحنات الكهربائيّة، الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب، ولكن لا تخلط بين أقطاب المغناطيس والشحنات الكهربائيّة، فهما مختلفان تمامًا. ومن أهمّ هذه الاختلافات أنّنا نستطيع الحصول على كلٍّ من الشحنتين الموجبة والسالبة بشكلٍ منفرد، في حين لا نستطيع أبدًا الحصول على قطبٍ شماليٍّ منفردٍ أو قطبٍ جنوبيٍّ منفرد؛ فعند شطر قضيب مغناطيسيّ إلى قسمين، فإنّنا لا نحصل على قطبٍ شماليٍّ وآخر جنوبيٍّ منفردين، ولكنّنا نحصل على قضيبين مغناطيسيّين لكلٍّ منهما قطبٌ شماليٌّ وقطبٌ جنوبيٌّ، (الشّكل 20 – 3). ولو تكرّرت عمليّة الشّطر هذه، فسنحصل على قضبانٍ مغناطيسيّةٍ أخرى. يبحث الفيزيائيون في إيجاد مغناطيس وحيد القطب ولكن هذا البحث لم يسفر عن أيّ نتيجة حتى الآن.

من المعلوم أنّ الحديد فقط مع بعض المواد الأخرى مثل الكوبالت، والنيكل، والجادولينيوم، وبعض أكاسيدها وخلائطها يرينا تأثيرات مغناطيسيّة قوية، وتُسَمّى هذه المواد المواد **الفرّومغناطيسيّة** (من الكلمة اللاتينية *ferrum*، وتعني حديد). وهناك مواد أخرى تظهر تأثيرات مغناطيسيّة طفيفة وضعيفة نستطيع قياسها بأجهزة أكثر تعقيدًا. وسنقدم تفاصيل أكثر عن المواد الفرّومغناطيسيّة في (البند 20 – 12).

لقد استخدمنا في (الفصل 16) مصطلح المجال الكهربائيّ الذي يحيط بالشحنة الكهربائيّة، وبالطريقة نفسها نستطيع تخيّل **مجال مغناطيسيّ** يحيط بالمغناطيس، أي أنّ القوّة التي يؤثر بها مغناطيس في آخر يمكن وصفها بأنّها تنتج من التفاعل بين مغناطيس والمجال المغناطيسيّ لمغناطيس آخر، وكما رسمنا **خطوط المجال الكهربائيّ**، فإنّنا نستطيع أيضًا رسم خطوط المجال المغناطيسيّ. ونستطيع رسمها كما هو الحال في المجال الكهربائيّ بحيث يكون: 1- اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند نقطة هو المماس على خط المجال عند تلك النقطة. 2- عدد خطوط المجال في وحدة المساحة يتناسب مع شدة المجال المغناطيسيّ.

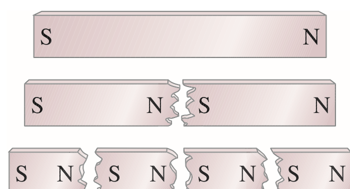
ونستطيع تحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند نقطة معيّنة من اتّجاه القطب الشّماليّ لإبرة بوصلة موضوعة عند تلك النقطة تعريف أكثر دقة سيقدم في (البند 20 – 3). ويرينا (الشّكل 20 – 4أ) تخطيطًا للمجال المغناطيسيّ باستخدام برادة الحديد (التي تعمل كمغانط دقيقة) والاتّجاه يحدد من البوصلات الصغيرة. والمجال المغناطيسيّ المحدد بهذه الطريقة موضح في (الشّكل 20 – 54) (ب). لاحظنا (اصطلاحًا) أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ تخرج من القطب الشّماليّ باتّجاه القطب الجنوبيّ (يتجاذب القطبُ الشّماليّ للبوصلة المغناطيسيّة مع القطبِ الجنوبيّ للمغناطيس).

تستمرّ خطوط المجال المغناطيسيّ داخل المغناطيس كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 4 ب). في الواقع، ونظرًا لعدم وجود قطب منفرد، فإنّ خطوط المجال المغناطيسيّ دائمًا تشكّل حلقة مغلقة بعكس خطوط المجال الكهربائيّ التي تبدأ من الشحنة الموجبة وتنتهي بالشحنة السالبة.



الشّكل 20 – 2 الأقطاب المتشابهة للمغناطيس تتنافر والمختلفة تتجاذب.

الشّكل 20 – 3 إذا شطرت مغناطيسًا فلن تحصل على قطب منفرد ولكنك ستحصل على مغناطيسين لكلّ منهما قطب شماليّ وآخر جنوبيّ.



تنويه:

المغناطيس لا يجذب كل الفلزات.

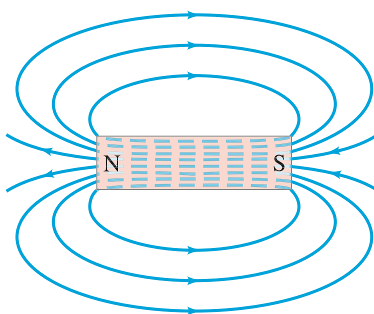
خطوط المجال المغناطيسيّ

تنويه:

تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ حلقة مغلقة على خلاف خطوط المجال الكهربائيّ.



(أ)



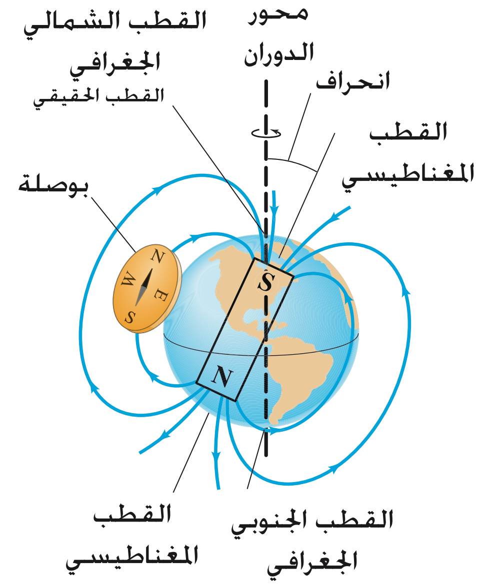
(ب)

الشّكل 20 – 4 (أ) تخطيط المجال المغناطيسيّ يكون باستخدام برادة الحديد، وباستخدام مجموعة بوصلات. النهاية الحمراء للقضيب المغناطيسيّ تمثل القطب الشّماليّ. القطب الشّماليّ للإبر المغناطيسيّة يُشير بعيدًا عن القطب الشّماليّ للمغناطيس. (ب) خطوط المجال المغناطيسيّ لقضيب مغناطيسيّ.

المجال المغناطيسيّ للأرض

المجال المغناطيسيّ للأرض موضّح في (الشّكل 20 – 5)، حيث يكون نمط خطوط المجال كما لو كان هنالك قضيبٌ مغناطيسيّ تخيليّ داخل الأرض. ولأنّ القطب الشّماليّ (CN) لإبرة البوصلة يشير إلى الشّمال، فإنّ القطب المغناطيسيّ الأرضيّ الذي يكون باتّجاه الشّمال الجغرافيّ هو القطب الجنوبيّ (S)، كما يُستنتج من (الشّكل 20 – 5). تذكر أنّ القطب الشّماليّ لمغناطيس يتجاذب مع القطب الجنوبيّ لمغناطيس آخر. القطب الأرضيّ الموجود في الشّمال ما زال يسمى القطبَ الشّماليّ المغناطيسيّ أو القطبَ الشّماليّ الجيومغناطيسيّ، ببساطة، لأنّه يقع في الشّمال. وينطبق هذا الكلام على القطب الجنوبيّ المغناطيسيّ الذي يكون بالقرب من القطب الجنوبيّ الجغرافيّ مع أنه في الواقع من الناحية المغناطيسيّة قطب شماليّ (N). إنّ الأقطاب المغناطيسيّة الأرضية لا تتطابق مع الأقطاب الجغرافيّة التي تقع على محور دوران الأرض؛ فالقطب الشّماليّ المغناطيسيّ مثلاً يقع في منطقة كنديّة،[1] ويبعد 900 Km عن القطب الشّماليّ الجغرافيّ (أو القطب الحقيقيّ). وهذا الفرق يجب أن يؤخذ بالحسبان عند استخدام البوصلة. (الشّكل 20 – 6). ويُسَمّى الفرقُ الزّاويُّ بين القطب المغناطيسيّ الشّماليّ والقطب الشّماليّ الحقيقيّ (الجغرافيّ) الميلَ المغناطيسيَّ **magnetic declination**. وفي الولايات المتحدة، يتغير هذا الميل من 0° إلى نحو 20° اعتمادًا على الموقع.

لاحظ في (الشّكل 20 – 5) أنّ المجال المغناطيسيّ الأرضيّ في معظم المواقع ليس مماسًا على سطح الأرض. تُعرف الزاوية التي يصنعها المجال المغناطيسيّ مع الاتجاه الأفقي عند أيّ نقطة بزاوية الانحدار **angle of dip**.



الشّكل 20 - 5 تبدو الأرض وكأنها مغناطيس ضخم، ولكن أقطابها المغناطيسيّة ليست باتجاه الأقطاب المغناطيسيّة الجغرافيّة التي تقع على محور دوران الأرض

تمرين أ: أين يمتلك المجال المغناطيسيّ الأرضيّ قيمة أكبر: عند الأقطاب أم عند خطّ الاستواء. مفتاح الحلّ: لاحظ خطوط المجال في (الشّكل 20- 5).

تطبيق الفيزياء
استخدام البوصلة.

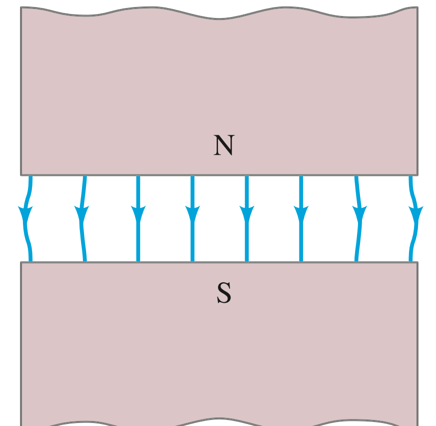


الشّكل 20 – 6 استخدام بوصلة وخريطة في البراري. أولا، تشير إبرة البوصلة بعيدًا عن اتجاه الشّمال بزاوية تساوي تمامًا زاوية الميل الموضحة في الخريطة (15°). بعد ذلك، وجِّه الخريطة باتجاه الشّمال الصحيح دون النظر إلى إبرة البوصلة.

المجال المغناطيسيّ المنتظم

إنّ أبسط مجالٍ مغناطيسيٍّ هو المجال المنتظم، وهو المجال الذي لا تتغير قيمته واتّجاهه من نقطة إلى أخرى. ويصعب إيجاد المجال المنتظم تمامًا في مساحة واسعة. ولكن المجال الموجود بين قطبين مسطحين عريضين ومتوازيين يعدّ منتظمًا على نحو تقريبيّ إذا كانت مساحة كلّ وجه من هذين القطبين كبيرة مقارنة بالمسافة بينهما، (الشّكل 20 – 7). وعلى الأطراف، يميل المجال إلى الخارج قليلا. ولهذا، لا تكون خطوط المجال متوازية، ولا يكون المجال منتظمًا. أمّا في المنطقة المركزية، فتكون خطوط المجال متوازية. وعليه، يكون المجال منتظمًا. وهذا يشبه المجال الكهربائيّ بين سطحين متوازيين. (الشّكل 17 -1)

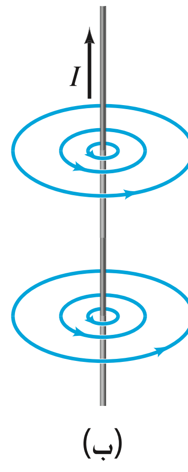
الشّكل 20 - 7 المجال المغناطيسيّ بين قطبين عريضين عبارة عن مجال منتظم تقريبًا باستثناء الأطراف.



(1) يتغير مكان القطب الشمالي المغناطيس عدّة كيلومترات في العام في الوقت الحاضر. وتظهر مغناطيسية الصخور أن اقطاب الأرض لم يتغير مكانها فقط خلال العصور الجيولوجية وإنما قد تغير اتجاهها 400 خلال الـ 330 مليون سنة الأخيرة.



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل 20 - 8 (أ) انحراف إبرة البوصلة بالقرب من سلك يحمل تيارًا كهربائيًّا يرينا وجود مجال مغناطيسيّ ويبيّن اتجاهه. (ب) خطوط المجال المغناطيسيّ حول سلك مستقيم يمرّ فيه تيّار كهربائيّ. (ج) قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسيّ: إذا أشار الإبهام إلى اتجاه التيار الكهربائيّ، فإنّ الأصابع الأخرى تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ.

2-20 التّيّارات الكهربائيّة تنتج مجالات مغناطيسيّة

تولد التيارات الكهربائية مجالات مغناطيسية

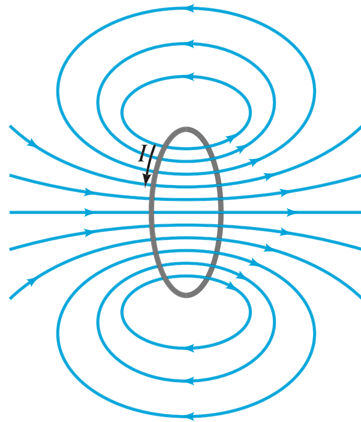
حاول عدة باحثين إيجاد العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسيّة في القرن الثامن عشر. فقد بدت الشحنات الكهربائيّة المتحركة والمغناطيس وكأنها لا تؤثر في بعضها. ولكن في عام 1820م، وجد هانز أورستد (1777 – 1851) أنّه عند وضع بوصلة بالقرب من سلك يمرّ فيه تيار كهربائيّ، فإنّ إبرة البوصلة تنحرف باتجاه ما. وبما أنّ إبرة البوصلة تنحرف بسبب المجالات المغناطيسيّة، فإنّ تجربة أورستد بيّنت أنّ التّيّار الكهربائيّ يُنتج مجالًا مغناطيسيًّا، أي أنّه أوجد نقطة الوصل بين الكهرباء والمغناطيسيّة.

قاعدة اليد اليمنى 1: اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربائي.

إنّ إبرة البوصلة الموضوعة بالقرب من سلك مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا تتأثر بقوة تؤدي إلى انحرافها باتّجاه المماس على دائرة حول السّلك، (الشّكل 20 – 8 أ). لذا، يكون المجال المغناطيسي المتولد حول سلك مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا على شكل دوائر يكون السّلك في مركزها، (الشّكل 20 – 8 ب). وهنالك طريقة بسيطة لتذكّر اتّجاه المجال المغناطيسيّ هي قاعدة اليد اليمنى: إذا أمسكنا السّلك باليد اليمنى بحيث يشير الإبهام إلى اتّجاه التيار الكهربائيّ (الموجب)، فإنّ الأصابع الأخرى تشير إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ، (الشّكل 20 – 8 ج).

ونستطيع تحديد خطوط المجال المغناطيسيّ الناتج من حلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا بالطريقة نفسها وباستخدام البوصلة كما هو واضح في (الشّكل 20 – 9). مرة أخرى، نستطيع استخدام قاعدة اليد اليمنى كما يوضّحها (الشّكل 20 – 10)، والمجال الناتج هنا هو مجال غير منتظم، ولا يشبه المجال المنتظم المبيّن في (الشّكلين 20 – 8، و 20 – 9)، فهو مجال يختلف في المقدار والاتجاه من نقطة إلى أخرى.

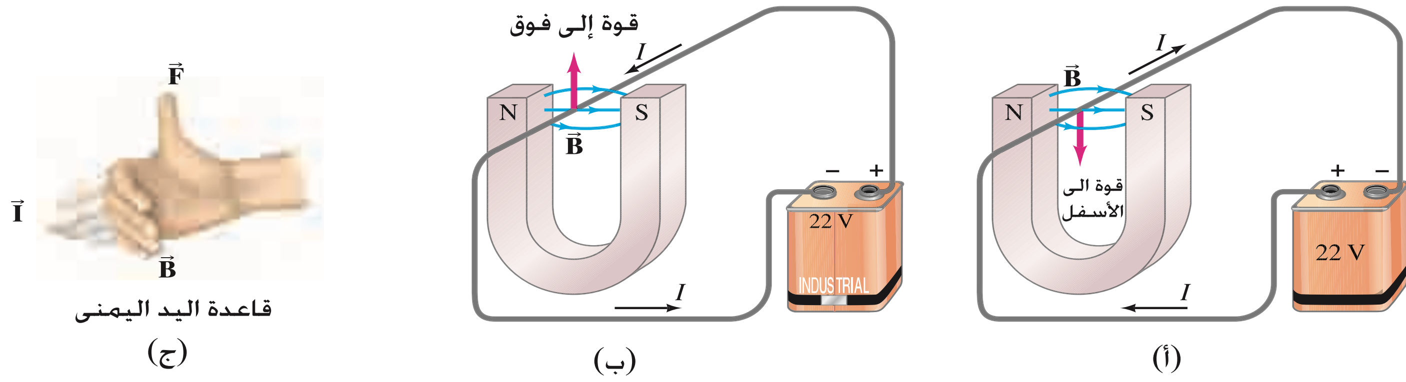
الشّكل 20 - 9 خطوط المجال المغناطيسيّ الناتج من حلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا.



تمرين ب: سلك مستقيم يحمل تيارًا باتّجاهك مباشرة، ما اتّجاه المجال المغناطيسيّ حول السّلك؟



الشّكل 20 – 10 قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسيّ بالنسبة لحلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا.



الشّكل 20 – 11 (أ) القوّة المؤثّرة في سلك يحمل تيارًا كهربائيًّا في مجال مغناطيسيّ $\vec{B}$. (ب) الشيء نفسه، ولكن التيار الكهربائيّ بالاتجاه المعاكس. (ج) قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوّة في (ب).

3-20 القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيّارًا في مجال مغناطيسيّ، تعريف $\vec{B}$

رأينا في (الجزء 20 – 2) أنّ التّيّار الكهربائيّ يؤثر بقوة معينة في المغناطيس كإبرة البوصلة. ومن قانون نيوتن الثالث، يمكن توقّع أنّ العكس سيكون صحيحًا، أي أنّنا نتوقع أنّ المغناطيس يؤثر بقوة في السلك الذي يحمل تيارًا كهربائيًّا. وهناك تجارب عدّة أكدت هذا التأثير، كان أولها التجربة التي أجراها أورستد.

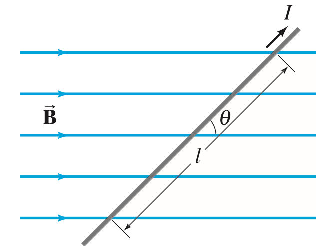
المغناطيس يؤثر بقوة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.

افرض أنّ لدينا سلكًا مستقيمًا موضوعًا في مجال مغناطيسيّ بين قطبي مغناطيس على شكل حذاء الفرس كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 11). عندما يمرّ تيار كهربائيّ في السّلك، فإنّ التجربة تبيّن أنّ هذا السّلك يتأثر بقوة معينة، ولكن هذه القوّة ليست باتجاه أحد قطبي المغناطيس، ولكنها تكون عموديّة على اتجاه المجال المغناطيسيّ، إلى الأسفل كما في (الشّكل 20 – 11 أ)، أو إلى الأعلى كما في (الشّكل 20 – 11 ب) اعتمادًا على اتجاه التّيّار. لقد بينت التجارب أنّ اتجاه القوّة المغناطيسيّة يكون دائمًا عموديًّا على كلّ من اتجاهي التّيّار والمجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.

قاعدة اليد اليمنى 2- لتحديد اتجاه القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ.

ويُحدَّد اتجاه القوّة بصورة أخرى من صور قاعدة اليد اليمنى كما هو موضح في (الشّكل 20 – 11 ج): وجّه يدك اليمنى المفتوحة بحيث تشير أصابع اليد تجاه التّيّار I، وعند ثني الأصابع فإنّها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$، وهنا يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة $\vec{F}$ المؤثّرة في السّلك.

تصف قاعدة اليد اليمنى اتجاه القوّة. ولكن ماذا عن مقدار هذه القوّة؟ لقد وُجد تجريبيًّا أنّ مقدار القوّة يتناسب طرديًّا مع مقدار التّيّار I، وطول السّلك L، ومقدار المجال المغناطيسيّ B، حيث تزداد القوّة كلما زاد المجال المغناطيسيّ. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ القوّة تعتمد على الزاوية θ بين اتجاهي التّيّار والمجال المغناطيسيّ (الشّكل 20- 12) وتتناسب مع $\sin\theta$ (جيب الزاوية):



الشّكل 20 – 12 موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ اتجاه القوّة عموديّ على الورقة إلى الداخل.

$$F \propto IlB\sin\theta.$$

وإذا كان ثابت التناسب يساوي 1 (وعلى اعتبار أنّ المجال المغناطيسيّ منتظم)، فإنّ القوّة تعطى بالعلاقة التالية: (20 – 1)

$$F = IlB\sin\theta.$$

وتكون هذه القوّة مساوية للصفر عندما $(\theta = 0°)$، أي عندما يكون اتجاه التّيّار موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسيّ، وتكون F قيمة قصوى عندما تكون $(\theta = 90°)$، أي عندما يكون اتجاه التّيّار عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسيّ وهنا تكون (20 – 2)

القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ منتظم.

$$F_{max} = IlB \qquad [\text{التيار عمودي على } \vec{B}]$$

(1) في مناقشتنا، افترضنا أن المجال المغناطيسي منتظم. حيث B في المعادلتين (20 -1) و(20 - 2) هو المجال المتوسط على الطول l للسلك.

تعريف المجال المغناطيسيّ

نستطيع تحديد مقدار المجال المغناطيسيّ B من (المعادلة 20 – 2) كما يلي: $B = F_{max}/Il$ حيث F_{max} مقدار القوّة على السلك الذي طوله l، ويحمل تيارًا مقداره I عموديًّا على المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.[†]

وحدات المجال المغناطيسيّ: التسلا (T) والجاوس (G)

إنّ وحدة المجال المغناطيسيّ في النظام الدوليّ للوحدات (SI) هي التسلا T(tesla). ويتضح من المعادلة $20-1$ أو $20-2$، أنّ m . $1\ T = 1N/\ A$. والاسم القديم للتسلا هو الويبر/ متر مربّع $(1Wb/\ m^2 = 1\ T)$ (*weber per meter*^{2}). وهناك وحدةٌ أخرى تُستخدم في تحديد المجال المغناطيسيّ في نظام cgs هي الجاوس T $1G = 10^{-4}$:(G) **gauss**. ويجب تحويل المجال المعطى بوحدة الجاوس إلى تسلا ليتناسب مع وحدات النظام الدوليّ (SI). ولإعطائك شعورًا بهذه الوحدات: نلاحظ أنّ المجال المغناطيسيّ للأرض عند سطحها يساوي $0.5 \times 10^{-4}\ T$. ومن جهة أخرى، تستطيع المغانط القوية نتاج مجال مغناطيسيّ تصل شدته إلى $2\ T$ كما تستطيع المغانط ذات الموصلية الفائقة (*supercon-ducting magnet*) إنتاج مجالات مغناطيسيّة تزيد شدتها على $10T$.

المثال 20-1 القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا

سلك طوله $l = 12\ cm$ ويحمل تيارًا مقداره 30-A، موضوع بين قطبي مغناطيس، وعلى زاوية $60°$ مع اتجاه المجال المغناطيسيّ الذي يساوي $0.90\ T$ تقريبًا. ما مقدار القوّة المؤثّرة في السّلك على اعتبار أنّ المجال منتظم؟

النّهج: نستخدم العلاقة $20-1$ لإيجاد القوّة المؤثّرة في السلك الموضوع في مجال مغناطيسيّ.

الحلّ: بتعويض $B = 0.90\ T$، $I = 30\ A$، $l = 12\ cm$، و $\theta = 60°$ في العلاقة $20-1$ نحصل على

$$F = IlB \sin\theta$$
$$= (30\ A)(0.12\ m)(0.90\ T)(0.866) = 2.8\ N$$

تمرين ج: السلك الذي يحمل التّيار الكهربائيّ من محطة التوليد إلى المدن، يحمل تيّارًا كهربائيًّا مقداره $30\ A$ عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسيّ الأرضيّ الذي مقداره $0.50 \times 10^{-4}\ T$. ما القوّة المؤثّرة في $100\ m$ من هذا السلك؟

عندما نمثل اتجاه التّيار أو المجال المغناطيسيّ بحيث يكون عموديًّا على الورقة باتجاه القارئ (إلى الخارج)، فإنّنا نستخدم الرمز ⊙ أو ×، وعندما يكون الاتجاه عموديًّا على الورقة بعيدًا عن القارئ (إلى الداخل)، فإنّنا نستخدم الرمز × أو ⊗. (انظر الشّكل $20-13$).

المثال 20-2 قياس المجال المغناطيسيّ

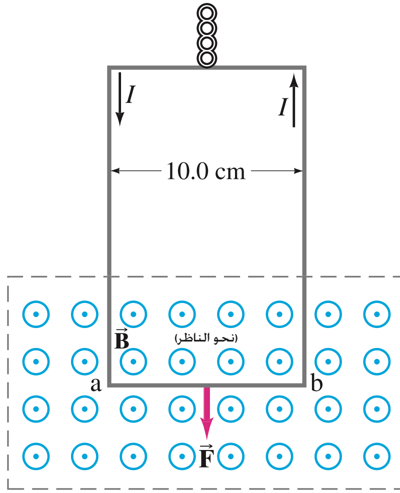
عروةٌ مستطيلة الشّكل معلّقة عموديًّا في ميزان زنبركيّ كما هو موضّح في (الشّكل $20-13$). إذا أثر مجال مغناطيسيّ أفقيّ بحيث يكون عموديًّا على الحلقة (عموديّ إلى الخارج ⊙)، وإذا كان المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$ منتظمًا تقريبًا، وكان طول الجزء الأفقيّ من الحلقة $a\ b$ يساوي $l = 10.0\ cm$، ويقع تقريبًا في مركز مغناطيس كبير ينتج المجال. الجزء العلوي للحلقة يقع بعيدًا عن المجال المغناطيسيّ. إذا كانت قراءة الميزان الزّنبركيّ $F = 3.48 \times 10^{-2}\ N$ عندما لا يمر تيار في الحلقة، وصفرًا عندما يمرّ تيار مقداره $I = 0.245\ A$ (هنا تكون الحلقة متزنة). احسب مقدار المجال المغناطيسيّ B.

النّهج: هنالك ثلاثة أجزاء من الحلقة تقع في المجال المغناطيسيّ: اثنان عموديّان وواحد أفقيّ. نطبّق (المعادلة $20-1$) ونستخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد مقدار القوّة المؤثّرة في كلّ جزء واتجاهها.

الحلّ: القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الجزء العمودي الأيمن تكون باتجاه اليسار، أمّا في الجزء العمودي الأيسر فتكون باتجاه اليمين، وهاتان القوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا، وبالتالي تكون محصلتاهما صفرًا. لذا، تبقى القوّة المؤثّرة في الجزء الأفقي وهي تساوي قوة الجاذبيّة عند الاتزان، وهنا تكون $\theta = 90°$، و $\sin\theta = 1$. وعليه، يكون

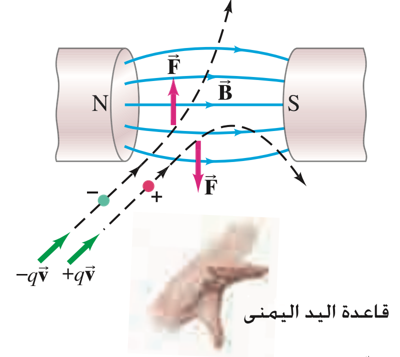
$$B = \frac{F}{Il} = \frac{3.48 \times 10^{-2}\ N}{(0.245\ A)(0.100\ m)} = 1.42\ T$$

ملحوظة: يمكن استخدام هذه الطريقة في حساب شدة المجال المغناطيسيّ.



الشّكل 20 – 13 قياس المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$. المثال 20 - 2.

4-20 القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ



الشّكل 20 – 14 القوّة المؤثّرة في جسيمات مشحونة متحركة في مجال مغناطيسيّ عموديًّا عليه.

القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ.

ناقشنا سابقًا أنّ السّلك الذي يحمل تيّارًا كهربائيًّا يتأثر بقوة عند وضعه في مجال مغناطيسيّ، وحيث إنّ التيار الكهربائيّ في السّلك يتكون من شحنات متحركة، فمن المتوقع أنّ الشحنات التي تتحرك بحرية (خارج السلك) ستتأثر أيضًا بقوة عند مرورها في مجال مغناطيسيّ. وعليه، نستنتج أنّ القوّة المؤثّرة في شحنة منفردة تتحرك في مجال مغناطيسيّ. لو كان لدينا N من الجسيمات المشحونة بشحنة مقدارها q تمر في نقطة معينة في زمن t فإنّها تكوّن تيارًا مقداره $I = Nq/t$. إذا كان t هو الزمن اللازم للشحنة q حتى تتحرك مسافة L في المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$، فيكون $l = vt$ حيث v مقدار سرعة الجسيم $\vec{\mathbf{v}}$. وهنا، تعطى القوّة المؤثّرة في N من الجسيمات من خلال المعادلة $20 - 1$ كما يلي:

$$F = IlB\sin\theta = (Nq/t)(vt)B\sin\theta = NqvB\sin\theta.$$

وبالتالي، فإنّ القوّة المؤثّرة على جسيم واحد تساوي

$$F = qvB\sin\theta. \qquad (3 - 20)$$

وهذه المعادلة تعطي مقدار القوّة التي يؤثر بها المجال المغناطيسيّ في الجسم المشحون بشحنة q، ويتحرك بسرعة v داخل المجال الذي قيمته B. الزاوية بين $\vec{\mathbf{v}}$ و $\vec{\mathbf{B}}$ هي θ، وتكون القوّة أكبر ما يمكن عندما يتحرك الجسيم عموديًّا على اتّجاه $\vec{\mathbf{B}}$ $(\theta = 90^\circ)$.

$$F_{\max} = qvB \qquad [\vec{\mathbf{v}} \perp \vec{\mathbf{B}}] \qquad (4 - 20)$$

في حين تساوي القوّة صفرًا عندما يتحرك الجسم باتّجاه موازٍ لاتّجاه المجال المغناطيسيّ $(\theta = 0^\circ)$. يكون اتّجاه القوّة عموديًّا على كلّ من المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ والسرعة $\vec{\mathbf{v}}$، ويحدد باستخدام **قاعدة اليد اليمنى** أيضًا.

قاعدة اليد اليمنى (3) القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$.

وجِّه يدك اليمنى المفتوحة بحيث تشير أصابع اليد (عدا الإبهام) إلى اتّجاه السرعة، وعند ثنيها إلى اتّجاه المجال، فإنّ الإبهام يشير إلى اتّجاه القوّة. وهذا ينطبق على الشحنات الموجبة. وبالتالي، تكون القوّة للوضع المبيّن في (الشّكل 20 – 14) إلى الأسفل. أمّا بالنسبة إلى الشحنات السالبة، فتكون القوّة بالاتّجاه المعاكس تمامًا، إلى الأعلى في (الشّكل 20 – 14).

المثال المفاهيمي 20 - 3 الاستراتيجية الخطأ

وُضِعَتْ شحنةٌ سالبة $-Q$ ساكنة بالقرب من مغناطيس. هل ستبدأ هذه الشحنة بالحركة؟ وهل ستتأثر بقوة؟ ما هو الوضع إذا كانت الشحنة موجبة $+Q$؟

الحلّ: الجواب لا في الحالات كلها؛ لأنّ المجال يؤثر بقوة في الأجسام المتحركة فقط (المعادلة 20-3).

المثال 20-4 القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في البروتون

يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 5.0×10^6 m/s في مجال مغناطيسيّ، فيتأثر بقوة مقدارها 8.0×10^{-14} N باتّجاه الغرب عندما يتحرك عموديًّا للأعلى (الشّكل 20 – 15 أ). إذا تحرك أفقيًّا باتّجاه الشّمال، فإنّه لا يعاني من أيّ قوة (الشّكل 20 – 15 ب). أوجد مقدار المجال المغناطيسيّ واتّجاهه في هذا المكان (شحنة البروتون هي $q = +e = 1.6 \times 10^{-19}$ C).

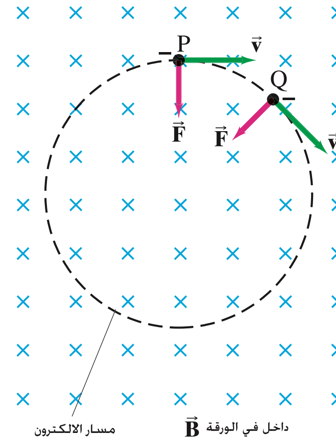


الشّكل 20 – 15 المثال 20 - 4

النّهج: لأنّ البروتون لا يعاني من أيّ قوة عندما يتحرك شمالاً، فيجب أن يكون المجال المغناطيسيّ باتّجاه الشّمال أو الجنوب. وحتى تكون القوّة المؤثّرة إلى الغرب عندما يتحرك البروتون إلى الأعلى، فإنّ قاعدة اليد اليمنى تعطينا أنّ المجال المغناطيسيّ يجب أن يشير إلى الشّمال. (يشير الإبهام إلى الغرب، في حين تشير الأصابع الأخرى إلى أعلى، أمّا عند ثنيها فتشير إلى الشّمال). ويمكن إيجاد مقدار المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ باستخدام (المعادلة 20 – 3). وبوضع $\theta = 90^\circ$ نحصل على

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{8.0 \times 10^{-14}\,\text{N}}{(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})(5.0 \times 10^6\,\text{m/s})} = 0.10\,\text{T}.$$

تمرين د: (D) في المثال 20 – 4، أوجد القوّة المؤثر في البروتون إذا تحرك أفقيًّا إلى الجنوب.



الشّكل 20 - 16 القوّة التي يؤثر بها مجال مغناطيسيّ منتظم في جسيم متحرك مشحون (في هذه الحالة يتحرك إلكترون في مسار دائريّ).

مسار الجسيم المشحون الذي يتحرك في مستوى عموديّ على مجال مغناطيسيّ منتظم هو دائرة كما سنبيّن الآن. في (الشّكل $20-16$)، يشير المجال المغناطيسيّ بشكل عموديّ إلى داخل الورقة، ويُمثّل بالرمز ($\times$). إذا بدأ إلكترون عند النقطة P بالحركة إلى اليمين، فإنّ القوّة المؤثّرة فيه عند هذه النقطة ستكون للأسفل (باستخدام قاعدة اليد اليمنى مع عكس الاتجاه بالنسبة للشحنات السالبة). لذا، سينحرف الإلكترون باتجاه الأسفل، وبعد لحظة عندما يصل الإلكترون النقطة Q، فإنّ القوّة تبقى عموديّة على اتجاه السرعة بالاتجاه الموضح في الشّكل. ولأنّ القوّة تبقى عموديّة على السرعة، فإنّ مقدار السرعة $\vec{v}$ لا يتغير. ولقد رأينا في الفصل الخامس أنه إذا كانت القوّة المؤثّرة في جسيم عموديّة دائمًا على اتجاه سرعته $\vec{v}$، فإنّ الجسيم في مسار دائري وبتسارع مركزي $a = v^2/r$ (المعادلة $5-1$). لذلك، يتحرك الجسيم المشحون في مسار دائري بتسارع مركزي ثابت (انظر المثال 20-5) في مجال مغناطيسيّ منتظم. يتحرك الإلكترون مع اتجاه عقارب الساعة في (الشّكل $20-16$). وسيتأثر الجسيم الموجب بقوة بالاتجاه المعاكس. لذا، سيتحرك بعكس اتجاه عقارب الساعة.

المثال 20-5 مسار الإلكترون في مجال مغناطيسيّ منتظم

يتحرك إلكترون بسرعة $2.0 \times 10^7\ \text{m/s}$ في مستوى عموديّ على مجال مغناطيسيّ منتظم شدته 0.010-T. صف مسار الإلكترون بشكل كمّيّ.

النّهج: يتحرك الإلكترون بسرعة v في مسار منحن. لذلك، فإنّه يمتلك تسارعًا مركزيًّا $a = v^2/r$ (معادلة $5-1$). ونستطيع إيجاد نصف قطر المسار باستخدام قانون نيوتن الثاني. (المعادلة $20-3$).

$F = qvB$ بوضع $\sin\theta = 1$

الحلّ: من قانون نيوتن الثاني كما يلي:

$$\Sigma F = ma$$

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

وبحلّ هذه المعادلة نجد أنّ

$$r = \frac{mv}{qB}$$

وحيث إنّ $\vec{F}$ عموديّة على $\vec{v}$ ، فإنّ مقدار $\vec{v}$ لا يتغير. ومن هذه المعادلة، نجد أنه إذا كان مقدار المجال المغناطيسيّ ثابتًا، فإنّ مقدار نصف القطر يبقى ثابتًا أيضًا. وعليه، فإنّ المنحنى يصبح دائرة كما استنتجنا سابقًا. ولإيجاد r، نعوض بالقيم المعطاة، فنحصل على

$$r = \frac{(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(2.0 \times 10^7\ \text{m/s})}{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(0.010\ \text{T})} = 1.1 \times 10^{-2}\ \text{m} = 1.1\ \text{cm}$$

طريقة حلّ الأسئلة: المجال المغناطيسيّ

يشبه المجالُ المغناطيسيُّ المجالَ الكهربائيَّ في وجه ما. ولكن هنالك عدة فروقات منها:

1. تكون القوّةُ المؤثّرةُ في جسيم مشحون يتحرك في المجال المغناطيسيّ عموديّةً على اتجاه المجال المغناطيسيّ (وليس باتجاه سرعة الجسم)، أمّا القوّة المؤثّرة في حالة المجال الكهربائيّ فتكون موازية لاتجاه المجال (ولا تتأثر بسرعة الجسيم).
2. تستخدم قاعدة اليد اليمنى بصيغها المختلفة لإيجاد اتجاه المجال المغناطيسيّ، والقوّة التي يؤثر بها في سلك يحمل تيارًا، أو في شحنات متحركة. صمّمت قاعدة اليد اليمنى (الجدول 20 – 1) لتتفاعل مع الطبيعة المتعامدة لهذه الكميات.
3. تستخدم المعادلات في هذا الفصل بشكل عام لتعطي المقادير فقط، وليست معادلات متجهة. وتستخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد اتجاهات الكميات المتجهة.

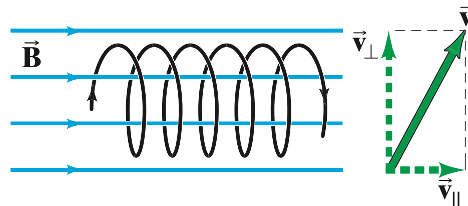
الجدول 20 – 1 ملخص لقواعد اليد اليمنى (RHR)

الوضع الفيزيائيّ	مثال	كيف نوجّه اليد اليمنى	النتيجة
1. المجال المغناطيسيّ الناتج من سلك يحمل تيارًا (RHR-1). قاعدة اليد اليمنى - 1	الشكل 20–8 (ج)	لفّ أصابعك حول السلك بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التّيار.	تشير الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$ حول السلك.
2. القوّة المؤثّرة من مجال مغناطيسيّ في سلك يحمل تيارًا. قاعدة اليد اليمنى- 2	الشكل 20–11 (ج)	تشير أصابع اليد المفتوحة إلى اتجاه التّيار I، وعند ثنيها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.	يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة.
3. القوّة المؤثّرة في شحنة $+q$ متحركة في مجال مغناطيسيّ. قاعدة اليد اليمنى- 3	الشكل 20–14 (ج)	تشير أصابع اليد المفتوحة إلى اتجاه السرعة $\vec{v}$، وعند ثنيها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.	يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة.

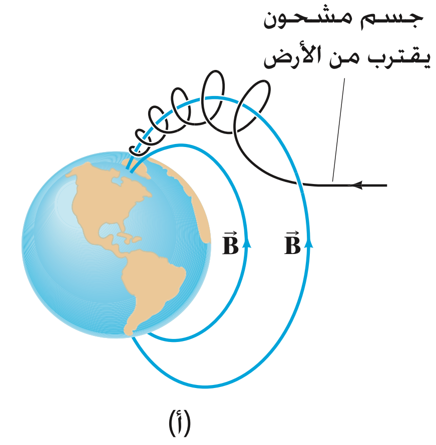
المثال المفاهيمي 20-6 المسار الحلزونيّ

ما مسار الجسيم المشحون المتحرك في مجال مغناطيسيّ إذا كانت السرعة غير متعامدة مع المجال المغناطيسيّ؟

الجواب: يمكن تحليل متجه السرعة إلى مركبتين: إحداهما موازية للمجال المغناطيسيّ، والأخرى متعامدة معه. المركبة الموازية للمجال لا تتأثر بقوة. لذا، تبقى ثابتة، وتؤدي إلى حركة الجسم باتجاه المجال. أمّا المركبة العمودية للسرعة فتؤدي إلى حركة الجسيم بمسار دائري. وبوضع هاتين الحركتين مع بعضهما، فإنّ الجسيم يتحرك في مسار حلزونيّ حول المجال المغناطيسيّ كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 17).



الشّكل 20 – 17 مثال 20-6



(أ)


(ب)

الشّكل 20 – 18 (أ) مخطط يرينا الجسيمات المشحونة التي تقترب من الأرض، والتي يتم أسرُها بواسطة مجال الجاذبيّة الأرضية. مثل هذه الجسيمات تتبع خطوط المجال باتجاه القطب كما هو موضح في الشّكل. (ب) صورة للشفق القطبيّ.

* الشّفق القطبيّ

تطبيق الفيزياء
الشّفق القطبيّ

تجتاز الأيونات المشحونة الأرض قادمةً من الشّمس (العواصف الشّمسيّة)، ثم تخترق الغلاف الجويّ بالقرب من الأقطاب مشكّلة أحيانًا ظاهرة تسمّى الشّفقَ القطبيَّ **(aurora borealis)** أو (الضّوء الشّماليّ) في النطاق الشّماليّ للكرة الأرضية. ولمعرفة سبب هذه الظاهرة: ارجع إلى المثال 20 – 6 (والشّكل 20 – 17). في (الشّكل 20 – 18)، تخيلنا عاصفة من الجسيمات المشحونة التي تجتاز الأرض. مركبة السرعة العموديّة على المجال لكلّ جُسيم تجعله يتحرك بمسارات دائرية حول خطوط المجال، في حين تدفع مركبة السرعة الموازية للمجال الجسيم باتجاه الأقطاب. وكلّما اقترب الجُسَيْمُ من القطب، يصبح المجال المغناطيسيّ أقوى، ويقلّ نصف قطر المسار الحلزونيّ. إنّ التركيز الكبير للجسيمات المشحونة يؤدي إلى تأيّن الهواء، مما يؤدي إلى انطلاق ضوء يسمّى الشّفقَ القطبيَّ، وهي ظاهرة ترافق زيادة إطلاق العواصف الشّمسيّة للجسيمات المشحونة باتجاه الأرض

* الضّرب الاتّجاهيّ

نستطيع كتابة (المعادلة 20 – 3) بصورة متجهة بدمجها مع قاعدة اليد اليمنى كما يلي:

$$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \qquad \textbf{(5 – 20)}$$

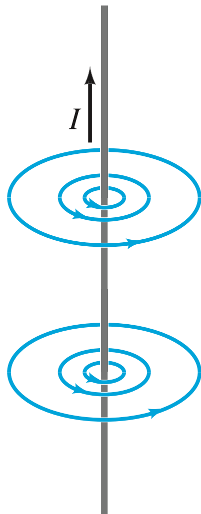
إنّ إشارة الضرب المتجه $(\times)$ تعطي قاعدة اليد اليمنى: بحيث نشير أولا بأصابع اليد المفتوحة باتجاه السرعة $\vec{\mathbf{v}}$، وعند ثنيها باتجاه المجال $\vec{\mathbf{B}}$، فإنّ الإبهام يشير إلى اتجاه القوّة $\vec{\mathbf{F}}$. ويتضمن الضرب المتجه $(\times)$ استخدام جيب الزاوية $(\sin\theta)$ لتحديد مقدار القوّة F. (المعادلة 20 – 5) هي معادلة متجه، وتدعى عملية الضّرب المتجه.

5-20 المجال المغناطيسيّ النّاتج من سلك مستقيم طويل

رأينا في (البند 20 – 2 والشّكل 20 – 8) أنّ المجال المغناطيسيّ المحيط بسلك مستقيم طويل يحمل تيارًا I عبارة عن دوائر يكون السّلك في مركزها. وتستطيع التّوقع بأنّ المجال عند نقطة معينة يكون أكبر كلّما كان التّيّار أكبر، وأنّ المجال يكون أقلّ كلّما ابتعدنا عن السلك. وهناك الكثير من التجارب التي أثبتت أنّ المجال النّاتج من التّيّار في سلك طويل مستقيم يتناسب طرديًّا مع التّيّار، وعكسيًّا مع المسافة r عن السلك

$$B \propto \frac{I}{r}$$

وتنطبق هذه العلاقة عندما يكون السلك طويلا مقارنة بالمسافة r.



الشّكل 20 – 19: كما ورد في الشّكل (20-8 ب). خطوط المجال المغناطيسيّ حول سلك مستقيم يحمل تيارًا (I).

لمجال المغناطيسيّ الناتج من تيار في سلك مستقيم طويل.

ثابت التناسب يساوي* $\mu_0/2\pi$. وبالتالي، يكون (المجال المغناطيسيّ لسلك مستقيم طويل

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r} \qquad (6 - 20)$$

ومقدار الثابت μ_0 الذي يسمى **السّماحية المغناطيسيّة للفراغ** هو: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$

المثال 20-7 حساب $\vec{B}$ بالقرب من سلك

سلك كهربائيّ في جدار عمارة يحمل تيارًا مستمرًا مقداره 25 A عموديًّا للأعلى. ما المجال المغناطيسيالناتج من هذا السلك عند نقطة P تقع على مسافة 10 cm شمال السلك (الشكل 20 - 20)؟

النهج: نفترض أنّ طول السلك أكبر بكثير من مسافة 10 cm التي تقع عندها النقطة P. وعليه، نستطيع تطبيق المعادلة 20 - 6.

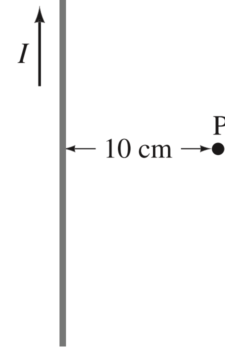
الحل: بالرجوع إلى المعادلة 20 - 6 يكون

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(25\,\mathrm{A})}{(2\pi)(0.10\,\mathrm{m})} = 5.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$$

أو 0.050 G ومن قاعدة اليد اليمنى (الشكل 20 - 8 ج). فإنّ المجال عند هذه النقطة يكون باتجاه الغرب (داخل إلى الورقة في الشّكل 20 - 20).

ملحوظة: مجال السّلك يساوي مجال الجاذبيّة الأرضية تقريبًا. لذا، فإنّ البوصلة عند هذه النقطة لا تشير إلى الشّمال، بل إلى الشّمال الشّرقيّ.

ملحوظة: تتكون معظم أسلاك التوصيل في المباني من كيبلات تحتوي على سلكين يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين. ولهذا، فإنّ المجال المغناطيسيّ الناتج منهما يلغي بعضه بعضًا.



الشّكل 20 - 20 المثال 20 - 7

تنويه:

البوصلة بالقرب من تيار كهربائيّ لا تشير إلى اتجاه الشّمال.

المثال 20-8 المجال المغناطيسيّ عند منتصف المسافة بين سلكين حاملين تيارًا

سلكان مستقيمان متوازيان، المسافة بينهما 10.0 cm، يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين. التّيّار $I_1 = 5.0\,\mathrm{A}$ خارج من الورقة. والتّيّار $I_2 = 7.0\,\mathrm{A}$ داخل إليها (الشكل 20 - 21). احسب المجال المغناطيسيّ بالمقدار والاتجاه عند نقطة تقع في منتصف المسافة بينهما.

النّهج: المجال الناتج من كلا السّلكين يحسب من العلاقة 20 - 6. ويحدّد الاتجاه من قاعدة اليد اليمنى. المجال الكليّ هو حاصل جمع المجالين.

الحل: تقع نقطة المنتصف على مسافة 0.050 m عن كلا السّلكين. ومن (المعادلة 20 - 6) نحصل على

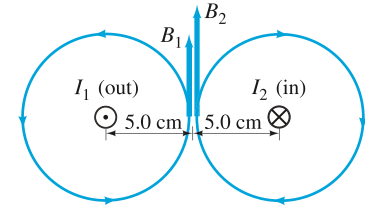
$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(5.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.050\,\mathrm{m})} = 2.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T} \quad \text{(إلى الأعلى)}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(7.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.050\,\mathrm{m})} = 2.8 \times 10^{-5}\,\mathrm{T} \quad \text{(إلى الأعلى)}$$

إذن، يكون المجال الكلي إلى الأعلى، ويساوي

$B = B_1 + B_2 = 4.8 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$.

الشّكل 20 – 21 المثال 20 - 8 يحمل السلكُ 1 تيار I1 خارج من الورقة، والسلك 2 يحمل تيار I_2 داخل إليها، فينتج مجالان يكون شكل خطوطهما دوائر حول كلا السّلكين.

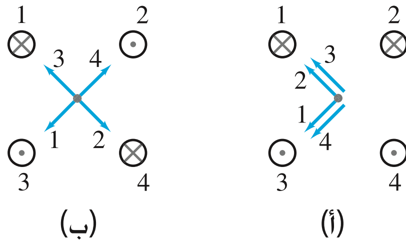


* تم اختيار الثابت بهذه الصورة المعقدة بحيث يكون لقانون أمبير (البند 20 - 8) شكل بسيط وجميل.

المثال المفاهيمي 9-20 **المجال المغناطيسيّ الناتج من أربعة أسلاك**

يرينا (الشكل 20 – 22) أربعةَ أسلاك طويلةً متوازيةً، تحمل تيارات متساوية باتجاه داخل الورقة أو خارجة منها. في أيّ الوضعين يكون المجال المغناطيسيّ في مركز المربع أكبر: (أ) أم (ب)؟

الجواب: يكون المجال المغناطيسيّ أكبر في (أ). تشير الأسهم إلى اتجاهات المجالات الناتجة من كلّ سلك. وتستطيع التأكّد من هذه الاتجاهات باستخدام قاعدة اليد اليمنى. يكون المجال المغناطيسيّ الكلّيّ إلى اليسار في الوضع (أ)، ويساوي صفرًا في الوضع (ب).



الشّكل 20 – 22 المثال 20 - 9

6-20 القوّة بين سلكين متوازيين حاملين للتيار

لقد رأينا أنّ السلك الذي يحمل تيارًا ينتج مجالا مغناطيسيّا (مقداره يعطى بالعلاقة 20 – 6 لسلك مستقيم طويل). بالإضافة إلى ذلك، وجدنا أنّ الموصل الذي يحمل تيارًا يتأثر بقوة عند وضعه في مجال مغناطيسيّ (البند 20 – 3، العلاقة 20 – 1). ولذلك، فإنّنا نتوقع أنّ السلكين المتوازيين اللذين يحملان تيارين يؤثران بقوة في بعضهما.

إذا كان لدينا سلكان طويلان متوازيان بينهما مسافة d كما في (الشّكل 20 – 23 أ) يحملان تيارين: I_1 و I_2، على الترتيب، فإنّ كلّ تيار يُنتج مجالاً مغناطيسيًّا يؤثر في السّلك الآخر. على سبيل المثال، المجال المغناطيسيّ B_1 الناتج من التّيّار I_1 في (الشّكل 20 – 23) يعطى بالعلاقة 20 – 6 عند موقع السلك الثاني كما يلي:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{d}$$

انظر إلى (الشّكل 20 – 23 ب) حيث إنّ المجال الناتج من التّيّار I_1 فقط موضح فيه . واستنادًا إلى العلاقة 20 – 2، فإنّ القوّة F_2 المؤثّرة من المجال B_1 على قطعة طولها L_2 من السلك الثاني الذي يحمل تيارًا مقداره I_2 هي

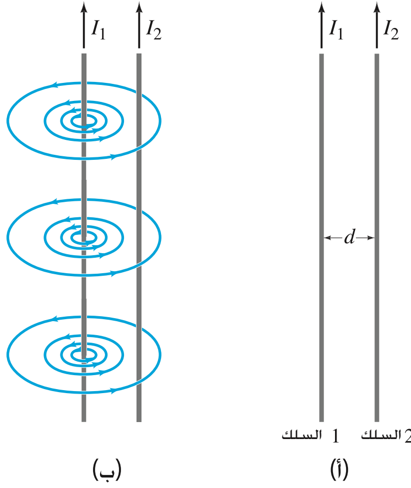
$$F_2 = I_2 B_1 l_2$$

لاحظ أنّ القوّة على I_2 هي من المجال الناتج من I_1 فقط. وبالطبع، فإنّ I_2 يُنتج مجالاً، ولكنّه لا يؤثر في نفسه. وبتعويض قيمة B_2 في المعادلة السابقة، نجد أنّ القوّة F_2 المؤثّرة في L_2 من السلك الثاني هي

$$F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} l_2 \qquad \textbf{(7 – 20)}$$

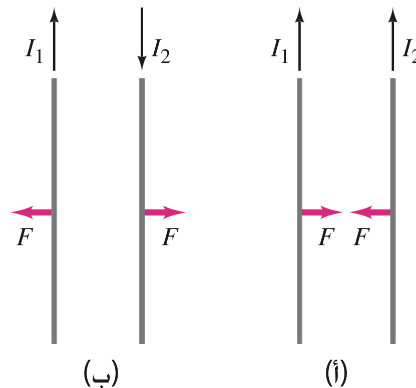
الشّكل 20 – 23

(أ) سلكان متوازيان يحملان تيارين؛ I_1 و I_2.
(ب) المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}_1$ الناتج من I_1 (المجال الناتج من I_2 غير موضح بالصورة). اتجاه $\vec{\mathbf{B}}_1$ داخل للورقة عند موقع التّيّار I2.



إذا استخدمنا قاعدة اليد اليمنى -1. (الشكل 20 - 8 ج). نرى أنّ خطوط المجال تكون كما في (الشكل 20 - 23 ب).

وإذا طبّقنا قاعدة اليد اليمنى الموضّحة في (الشّكل 20 – 11 ج)، فإنّ القوّة المؤثّرة في I_2 ستكون إلى اليسار في (الشّكل 20 – 23 ب). أي أنّ I_1 يؤثر بقوة تجاذب في I_2 (الشّكل 20 – 24 أ) . وهذ صحيح إذا كان التّيّاران بالاتجاه نفسه، أما إذا كانا في اتجاهين متعاكسين، فتكون القوّة بينهما قوة تنافر (الشكل 20 – 24 ب). وبالطريقة ذاتها نستطيع توضيح أنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من I_2 يؤثر بقوة مساوية ومعاكسة بالاتجاه في I_1. ونستطيع أن نتوقع هذا أيضًا من قانون نيوتن الثالث. ولهذا، فإنّ السلكين المتوازيين اللذين يحملان تيارين يجذبان بعضهما إذا كانا بالاتجاه نفسه، ولكنّهما يتنافران إذا كانا باتجاهين متعاكسين.



الشّكل 20 - 24
(أ) التّيّاران المتوازيان يؤثّران في بعضهما بقوة تجاذب إذا كانا بالاتجاه نفسه.
(ب) التّيّاران المتوازيان يؤثّران في بعضهما بقوة تنافر إذا كانا باتجاهين متعاكسين.

المثال 20-10 القوّة بين سلكين حاملين للتيار

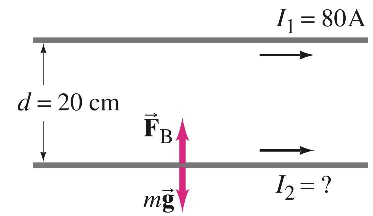
سلكان في كابل واحد، طول كلٍّ منهما 2.0-m، والمسافة بينهما 3.0 mm، يحملان تيارًا ثابتًا مقداره 8.0 A باتّجاهين متعاكسين. احسب القوّة المتبادلة بينهما.

النّهج: يقع كلّ تيار في المجال المغناطيسيّ للآخر. وبتطبيق المعادلة 20 – 7. نستطيع معرفة المطلوب $\mu_0/2\pi = 2.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$.

الحلّ: باستخدام المعادلة 20 – 7 نحصل على

$$F = \frac{(2.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(8.0\,\mathrm{A})^2(2.0\,\mathrm{m})}{(3.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m})} = 8.5 \times 10^{-3}\,\mathrm{N}$$

التّيّاران باتّجاهين متعاكسين. لذا، فإنّ القوّة بينهما قوة تنافر.



الشّكل 20 – 25 المثال 20 - 11

المثال 20-11 تعليق سلك يحمل تيارًا باستخدام سلك آخر يحمل تيارًا.

يحمل سلك أفقيّ تيارًا $I_1 = 80\ \mathrm{A}$. إذا كان هنالك سلكٌ آخر موازٍ لهذا السّلك، ويقع تحته مباشرة على مسافة 20 cm (الشّكل 20 – 25). وإذا كانت كتلة السّلك السّفليّ 0.12 g للمتر الواحد، فما مقدار التّيّار الذي يجب أن يمرّ فيه حتى لا يسقط بتأثير الجاذبيّة الأرضيّة؟

النّهج: حتى لا يسقط السّلك السّفليّ تحت تأثير الجاذبيّة الأرضيّة، فيجب أن تؤثّر فيه قوة أفقية للأعلى تساوي قوة الجاذبيّة الأرضية (وزن السلك)، وهنا يجب أن يكون التّيّاران في السلكين بالاتّجاه نفسه.

الحلّ: تؤثّر قوّةُ الجاذبيّة الأرضية على السلك الثاني للأسفل. وهنا، فإنّ قوّة الجاذبيّة لمترٍ واحدٍ من السلك تساوي

$$F = mg = (0.12 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg/m})(1.0\,\mathrm{m})(9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 1.18 \times 10^{-3}\,\mathrm{N}$$

القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك الثاني تعطى من العلاقة 20 – 7 كما يلي:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d}l$$

حيث $d = 0.20\,\mathrm{m}$، و $I_1 = 80\ \mathrm{A}$، و $l = 1.0\,\mathrm{m}$. وبمساواة هاتين القوتين نحصل على

$$I_2 = \frac{2\pi d}{\mu_0 I_1}\left(\frac{F}{l}\right) = \frac{2\pi(0.20\,\mathrm{m})}{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(80\,\mathrm{A})}(1.18 \times 10^{-3}\,\mathrm{N/m}) = 15\,\mathrm{A}$$

* تعريف الأمبير والكولوم

قد تتسائل كيف يمكن أن يكون الثابت μ_0 في المعادلة (20 - 6) مساويًا تمامًا للقيمة $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$. إليك الإجابة عن ذلك، حسب التعريف القديم، فقد قيست قيمة μ_0 مخبريًّا عن طريق التجربة وقد كانت قريبة جدًّا من هذه القيمة. أمّا الآن، فتعرف μ_0 على أنّها مساويةٌ تمامًا للقيمة $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$. وهذا لا يمكن حدوثه لو تم تعريف الأمبير بصورة مستقلة. فالأمبير وحدة التيار الكهربائي، يُعرّف بالاعتماد على المجال المغناطيسي B الذي ينتجه مستخدمين تعريف القيمة μ_0.

وبشكل جزئيّ، نستخدم القوّة بين سلكين متوازيين يحملان تيارين (المعادلة 20 - 7) لتعريف الأمبير بصورة دقيقة. فإذا كانت $I_1 = I_2 = 1\ \mathrm{A}$ تمامًا، وكانت المسافة بين السلكين تمامًا، فإنّ

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})}{(2\pi)}\frac{(1\,\mathrm{A})(1\,\mathrm{A})}{(1\,\mathrm{m})} = 2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N/m}$$

تعريف الأمبير والكولوم

وعليه، يُعرّف الأمبير على أنّه التّيّار الذي يمر في سلكين طويلين متوازيين، والمسافة بينهما *1 m* بحيث تنتج قوة مقدارها $2 \times 10^{-7}\ N/m$ لوحدة الأطوال لكلا السلكين.

وهذا تعريف دقيق للأمبير (ampere). وعليه يعرف الكولوم (coulomb) بأنّه أمبير. ثانية: $1\,\mathrm{C} = 1\,\mathrm{A\cdot s}$

7-20 الملفّ الحلزونيّ والكهرومغناطيسيّة

يتكوّن الملفّ الحلزونيّ من سلك ملفوف عدة لفات بشكل أسطوانيّ. المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ كبير نسبيًّا؛ لأنّه ينتج من الكهربائيّ المار في كلّ حلقة. إنّ الملفّ الحلزونيّ يؤثّر كالمغناطيس تمامًا وتكون إحدى نهايتيه قطبًا شماليًّا، في حين تكون النهاية الثانية قطبًا جنوبيًّا، وذلك استنادًا إلى اتّجاه التّيّار في الملف (باستخدام قاعدة اليد اليمنى). في (الشّكل 20 – 26)، يكون القطب الشّماليّ إلى اليمين. وكما سنرى في البند اللاحق، فإنّ المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ الذي يتكون من N لفة، وطوله L، ويحمل تيارًا مقداره I، يعطى كما يلي:

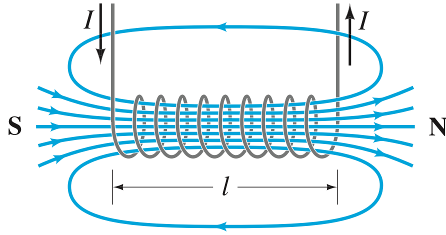
$$B = \mu_0 IN/l \qquad (8 – 20)$$

إذا وضعنا قطعة من الحديد داخل الملفّ الحلزونيّ، فسيزداد مجاله المغناطيسيّ؛ لأنّ الحديد يصبح مغناطيسًا. المجال المغناطيسيّ الكليّ هو مجموع المجالين المغناطيسيّين الناجين من التّيّار والحديد، ويمكن أن يكون مئة أو ألف ضعف من المجال الناتج من التّيّار فقط (انظر البند 20 – 12). مثل هذا المغناطيس الناتج من ملف حلزونيّ يحوي قلبًا من الحديد يُسَمّى **مغناطيسًا كهربائيًّا**.

إنّ المغانط الكهربائيّة لها عدّة تطبيقات عملية؛ تبدأ من استخدامها في الحركات والمولّدات إلى إنتاج مجالات مغناطيسيّة كبيرة تُستخدم في الأبحاث. وفي بعض الأحيان، نستخدم مغانط دون قلب حديديّ، والمجال المغناطيسيّ هنا ينتج من التّيّار في أسلاك الملفّ فقط. وفي بعض التطبيقات، تُصنعُ الأسلاك من مادة ذات موصلية فائقة تحفظ تحت درجة التحوّل (البند 18 – 9)، وتنتج المجالات المغناطيسيّة العالية جدًّا من هذه المواد دون استخدام قلب حديديّ. لا نحتاج إلى قدرة كهربائية للاحتفاظ بالتّيّارات العالية في الملفات فائقة الموصلية، مّا يعني توفير الطاقة وتقليل الحرارة المستنفذة.

وهناك أداةٌ أخرى مفيدة تتكوّن من ملفّ حلزونيّ يوضع جزئيًّا داخله قضيبٌ من الحديد. أحد أبسط الاستخدامات لهذا التركيب هو جرس الباب (الشّكل 20-27). عندما تغلق الدائرة بالضغط على المفتاح الخارجي، فإنّ الملفّ يصبح مغناطيسًا، وعندئذٍ يؤثر بقوة في قضيب الحديد، فيجذبه نحو الجرس. كما أنّ هناك ملفا حلزونيًا كبيرا يستخدم في باديء حركة السيارة؛ فعند تشغيلها، يمر التّيّار في محرك الباديء، فينشط الملفّ الحلزونيّ، مّا يجعله يتحرّك ليصبح على اتصالٍ مباشرٍ مع مبدّل السرعة المثبت على محرك العجلات. يستخدم الملفّ الحلزونيّ كمفتاح في كثيرٍ من الأجهزة، وله ميزة التحريك الميكانيكيّ لبعض الأجزاء بسرعة ودقة.

إنّ دوائر الحماية الحديثة جميعها التي تستخدم لحماية المنازل والمباني من الحمل الزائد أو الحرائق تحتوي على حساس مغناطيسيّ، وليس فقط على أجزاء حرارية ازدواج معدني حراري كما هو موضّح في (البند 18 – 6، الشّكل 18 – 19). إذا أصبح التّيّار الكهربائيّ فوق مستوى معين، فإنّ المجال المغناطيسيّ الناجم عنه يسحب صفيحة حديدية تؤدي إلى كسر نقطة التوصيل كما في (الشّكل 18 – 19 ب) و ج. وتحتوي دوائر الحماية الأكثر تعقيدًا على قواطع تيار أرضية مشروحة في (البند 21-8) يستخدم فيها الملف الحلزونيّ. القضيب الحديدي في (الشّكل 20 – 27) بدلا من قرعه الجرس، فإنّه يضرب جهة واحدة من زوج من النقاط فيفتحها، مما يؤدي إلى فتح الدارة الكهربائيّة. وتتفاعل قواطع الدارات المغناطيسية بسرعة (<10 msec) وفي المباني تصمم للتفاعل مع التيارات العالية للقواطع.

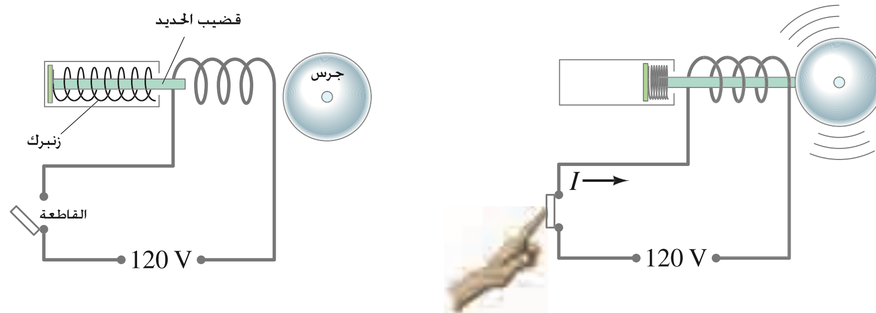


الشّكل 20 – 26 المجال المغناطيسيّ للملفّ الحلزونيّ. القطب الشّماليّ لهذا الملفّ الذي يعدّ كمغناطيس إلى اليمين والقطب الجنوبيّ إلى اليسار.

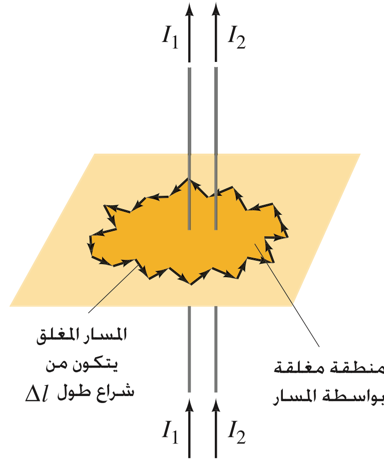
تطبيق الفيزياء
المغناطيس الكهربائيّ. والملف الحلزوني

تطبيق الفيزياء
جرس الباب، باديء حركة السيارة.

تطبيق الفيزياء
قواطع الدارات المغناطيسية.



الشّكل 20 – 27 الملفّ الحلزونيّ المستخدم في جرس الباب.



الشّكل 20 – 28 مسار اختياري يحوي تيارين كهربائيين للتعامل مع قانون أمبير. قسّم المسار إلى قطع طول كلّ منها Δl . التّيار الكليّ الذي يحويه المسار المغلق الموضح في الشّكل هو $I_{encl} = I_1 + I_2$.

* 8-20 قانون أمبير

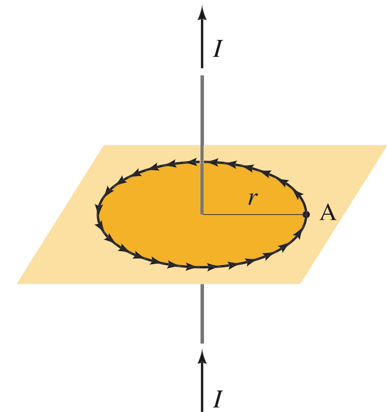
رأينا في (البند 20 – 5) أنّ (المعادلة 20 – 6) تعطينا العلاقة بين التّيار المار في سلك مستقيم طويل والمجال المغناطيسيّ الناتج منه. إنّ هذه المعادلة صالحة فقط في حالة وجود سلك مستقيم طويل. هل هنالك علاقة عامة بين التّيارِ في سلك مهما كان شكله والمجالِ المغناطيسيّ حوله؟ نعم؛ فالعالِم الفرنسي أندريه أمبير (1775 – 1836) اقترح مثل هذه العلاقة بعد وقت قصير من اكتشاف أورستد. اختر أيّ مسار مغلق حول التّيار، كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 28)، وتخيّل أنّه يتكوّن من قطع صغيرة، طول كلّ منها Δl. نأخذ حاصل ضرب طول كلّ قطعة في مركبة المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ الموازية لتلك القطعة. إذا جمعنا هذه الحدود، فإنّ الناتج (كما قال أمبير) يساوي μ_0 مضروبًا في التّيار I_{encl} الذي يمرّ بالسطح الذي يحويه المسار. وهذا هو قانون أمبير، ويمكن كتابته كما يلي:

قانون أمبير

$$\Sigma B_{\|}\,\Delta l = \mu_0 I_{encl} \qquad (20-9)$$

يعني الرمز Σ المجموع، أمّا $B_{\|}$ فتعني مركبة $\vec{\mathbf{B}}$ الموازية لـ Δl. تمّ اختيار الطول Δl صغيرًا بما يكفي لجعل $B_{\|}$ ثابتة لكلّ طول. ويجب أن يُعمل المجموع على مسار مغلق، و I_{encl} هو التّيار الكليّ المحصور بهذا المسار المغلق.

* المجال الناتج من سلك مستقيم



الشّكل 20 – 29 مسار دائري نصف قطره r

نستطيع اختبار قانون أمبير بتطبيقه على سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا I. لِنجدَ الآن مقدار المجال B عند النقطة A التي تبعد مسافة r عن السلك في (الشّكل 20 – 29). وكالمسار المستخدم في (المعادلة 20 – 9)، نختار مسارًا ملائمًا على شكل دائرة نصف قطرها r، لأنّه عند أيّ نقطة على هذا المسار يكون باتجاه المماس على هذه الدائرة. ولأيّ قطعة قصيرة من الدائرة (الشّكل 20 – 29) سيكون $\vec{\mathbf{B}}$ موازيًا لهذه القطعة. وعليه، $B_{\|} = B$. ولو فرضنا أننا قطّعنا المسار الدائريّ إلى 100 قطعة*، فإنّ قانون أمبير يعطي كما يلي:

$$(B\,\Delta l)_1 + (B\,\Delta l)_2 + (B\,\Delta l)_3 + \cdots + (B\,\Delta l)_{100} = \mu_0 I$$

تمثّل النقاطُ الحدودَ غير المكتوبة كلّها. وتبعد القطع كلّها المسافة نفسها عن السلك. وبسبب التماثل، فإنّ B متساوي عند القطع كلّها. لذا، يخرج B خارج المجموع، فنحصل على

$$B(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \cdots + \Delta l_{100}) = \mu_0 I$$

مجموع طول القطع Δl مجتمعةً هو محيط الدائرة، $2\pi r$، ويكون لدينا

* في الواقع يكون قانون أمبير دقيقًا عندما يكون هناك عددٌ كبيرٌ من قطعٍ صغيرة. لكن ذلك يقود إلى التكامل.

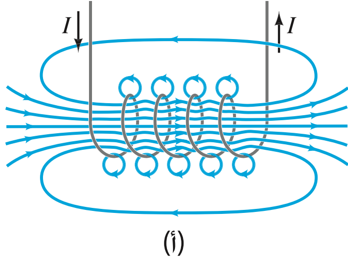
$$B(2\pi r) = \mu_0 I$$

أو:

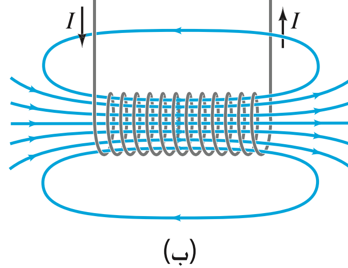
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

المجال المغناطيسيّ الناتج من سلك مستقيم باستخدام قانون أمبير.

وهذه هي (المعادلة 20 – 6) نفسها للمجال المغناطيسيّ بالقرب من سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا؛ أي أنَّ قانون أمبير يتوافق مع التجارب في هذه الحالة. وهناك عدد كبير من التجارب التي أكّدت أنّ قانون أمبير يمكن تطبيقه بشكل عام، حيث يمكن تطبيقه لحساب المجال المغناطيسيّ لأوضاع بسيطة ومتماثلة. إنّ أهمية قانون أمبير تكمن في أنّه يربط المجالين المغناطيسيّ والكهربائيّ بطريقةٍ مباشرةٍ وشائقة رياضيًّا. يُعدّ قانون أمبير واحدًا من القوانين الأساسيّة في الكهرباء والمغناطيسيّة، ويطبق على الأوضاع جميعها التي لا تتغير فيها التّيّارات والمجالات مع الزمن.



(أ)



(ب)

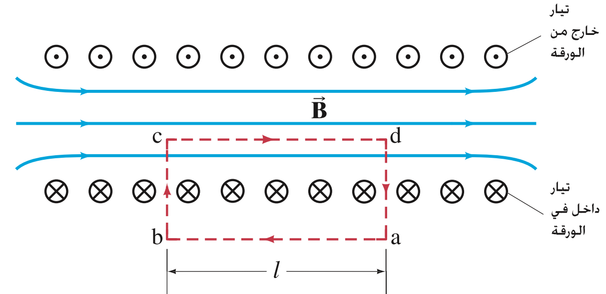
الشّكل 20 – 3 (أ) المجال المغناطيسيّ الناجم عن عدة حلقات من الملفّ الحلزونيّ. (ب) لحلقات متراصّة، فإنّ المجال الناتج يكون مُنتظما تقريبًا.

* المجال داخل الملفّ الحلزونيّ (اللولبيّ)

سنستخدم الآن قانون أمبير لحساب المجال المغناطيسيّ داخل ملف حلزونيّ يتكون من سلك ملفوف عدة لفات، (الشّكل 20 – 3). كلّ لفة تنتج مجالا كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 9). والمجال الكليّ داخل الملف الحلزونيّ هو مجموع المجالات الناجمة من كلّ حلقة كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 3 أ) لعدد من اللفات. إذا زاد عدد اللفات، وأصبحت متراصّة بشكل أكبر يصبح المجال في الداخل موازيًا لمحور الملف باستثناء الأطراف كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 3 ب). وخارج الملف، تنتشر خطوط المجال إلى الخارج في الفضاء، ويكون المجال خارج الملف أضعف منه في الداخل. ولتطبيق قانون أمبير: نختار المسار $abcd$ الموضح في (الشّكل 20 – 31) بعيدًا عن أطراف الملف. نفترض أنّ هذا المسار مكوّن من أربع قطع مستقيمة تشكل أضلاع مستطيل هي: ab, bc, cd, da. وباستعمال قانون أمبير، (المعادلة 20 – 9)، نحصل على

$$(B_{\|}\,\Delta l)_{ab} + (B_{\|}\,\Delta l)_{bc} + (B_{\|}\,\Delta l)_{cd} + (B_{\|}\,\Delta l)_{da} = \mu_0 I_{encl}$$

أول حدّ في المجموع إلى أقصى اليسار يساوي صفرًا تقريبًا؛ لأنّ المجال يكون مهملًا خارج الملفّ الحلزونيّ. إلى جانب أنّ $\vec{\mathbf{B}}$ يكون عموديًّا على القطعتين bc و cd، وتكون هذه الحدود مساوية للصفر، ويبقى الحدّ $(B_{\|}\,\Delta l)_{cd}$ فقط إلى اليسار. لذا، يكون $(B_{\|}\,\Delta l)_{cd} = Bl$، حيث B هو المجال داخل الملفّ الحلزونيّ، و l طول cd. ويصبح $B\,l$ مساويًا لـ μ_0 مضروبًا في التّيّار المحصور بالمستطيل الذي اخترناه.



الشّكل 20 – 31 مقطع عرضي للملفّ الحلزونيّ. المجال المغناطيسيّ داخله مستقيم باستثناء الأطراف. تمثل الخطوطُ الحمراء المقطّعة المسارَ الذي اخترناه لتطبيق قانون أمبير. ⊙ و ⊗ يمثلان اتجاه التّيّار في الحلقات خارج الصفحة وداخلها.

إذا كان التّيّار الذي يمر في سلك الملفّ الحلزونيّ هو I، فالتّيّار الكليّ المحصور في المسار $abcd$ هو NI، حيث N عدد اللفات داخل هذا المسار خمس لفات في (الشّكل 20 – 31). ونحصل من قانون أمبير على

المجال المغناطيسيّ داخل الملف الحلزونيّ.

و

$$Bl = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 IN}{l} \qquad \text{(الملفّ الحلزونيّ)} \qquad \textbf{(20 – 8 إعادة)}$$

وهذا ما استنتجناه في البند السابق، وهذا هو المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ. يعتمد B فقط على عدد اللفات لوحدة الطول N/l ومقدار التّيّار I، ولا يعتمد على الموقع داخل الملفّ الحلزونيّ، ويكون B منتظمًا داخل الملفّ الحلزونيّ، إذا كان الملفّ الحلزونيّ متناهي الطول، ولكنه يعطينا تقريبًا جيدًا للمجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ وبعيدًا عن الأطراف.

إنّ اتجاه المجال المغناطيسيّ تحدده قاعدة اليد اليمنى الأولى (الشّكل 20 – 8 ج) كما هو موضح في (الشّكل 20 – 31).

9-20 عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا والثناقطبي المغناطيسيّ

عندما يمرّ تيار كهربائيّ في حلقة مغلقة من سلك موضوعة في مجال مغناطيسيّ خارجيّ كما هو مبين في (الشّكل 20 –32)، فإنّ القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الحلقة تسبب عزم ازدواج، وهذا هو مبدأ عمل الكثير من الأجهزة العملية بما فيها الفولتميترات، والأميترات والمحركات الكهربائيّة (سنناقش هذه التطبيقات في البند القادم). ومن الجدير بالذكر أنّ التفاعل بين التّيّار والمجال المغناطيسيّ مهم في مجالات أخرى كالفيزياء الذرية.

عندما يمرّ تيار خلال الحلقة الموضحة في (الشّكل 20 – 32) أ بحيث يكون سطحها موازيًا للمجال المغناطيسيّ B، وإذا افترضنا أنّ الحلقة مستطيلة، فإنّ $\vec{\mathbf{B}}$ لا يؤثر بقوة ولا بعزم دورانيّ في الأضلاع الموازية له؛ لأنّ $\sin\theta = 0$ في المعادلة 20 – 1، ولكن المجال المغناطيسيّ يؤثر بقوة في كلّ من الضلعين المتعامدين مع المجال بقوتين هما: $\vec{\mathbf{F}}_1$ ، و $\vec{\mathbf{F}}_2$ (انظر الشّكل 20 – 32 ب). ومن قاعدة اليد اليمنى الثانية (الشّكل 20 – 11 ج)، فإنّ اتجاه القوّة على الضلع الذي يسري فيه التّيّار للأعلى (إلى اليسار) يكون معاكسًا لاتجاه القوّة على الضلع الذي يسري فيه التّيّار للأسفل (إلى اليمين)، ويكون مقدار القوتين متساويًا. هاتان القوتان تسببان عزم ازدواج يؤدي إلى دوران الملف حول محور دورانه. لنحسب الآن مقدار العزم الدورانيّ. من المعادلة 20 – 2، (I ⊥ B) تكون القوّة $F = IaB$، حيث a طول الضلع العمودي للملف. طول ذراع القوّة لكلتا القوتين هو $b/2$، حيث b عرض الملفّ. وهنا، يكون محور الدوران في المنتصف. العزم الناتج من كلتا القوتين $\vec{\mathbf{F}}_1$ ، و $\vec{\mathbf{F}}_2$ يؤثر بالاتجاه نفسه، ويكون العزم الكليّ هو المجموع الآتي:

$$\tau = IaB\frac{b}{2} + IaB\frac{b}{2} = IabB = IAB$$

حيث $A = ab$ هي مساحة حلقة الملف. وإذا كان عدد اللفات N يكون التّيّار NI. ويصبح العزم

$\tau = NIAB$

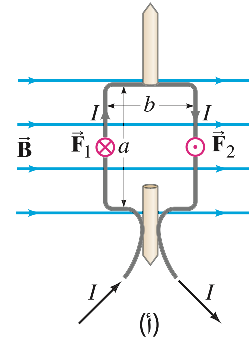
وإذا عمل الملف زاوية θ مع المجال المغناطيسيّ كما هو موضح في (الشّكل 20 – 32 ج) فإنّ القوّة لا تتغير، ولكن كلّ ضلع يتغير من $\frac{1}{2}b$ إلى $\frac{1}{2}b\sin\theta$. لاحظ أنّ الزاوية θ تؤثر بين اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ والعمودي على سطح الملف (الشّكل 20 – 32 ج)، وبالتالي يكون عزم الازدواج

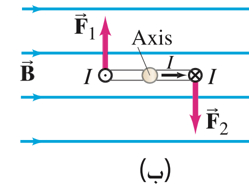
$$\tau = NIAB\sin\theta \qquad \textbf{(10 – 20)}$$

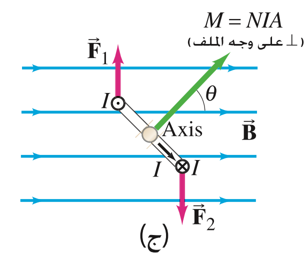
وتصلح الصيغة المشتقة للملف المستطيل هنا لأيّ شكل مسطح من الملفات. وتُسَمّى الكمية NIA الثناقطبي المغناطيسيّ للملف حيث

$$M = NIA \qquad \textbf{(11 – 20)}$$

وتمثل بمتجه عموديّ على سطح الملف.







الشّكل 20 – 32 حساب عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ. (أ) وجه الحلقة موازٍ للمجال B. (ب) مشهد علويّ. (ج) تصنع الحلقةً زاوية θ مع المجال مما يؤدي إلى تقليل العزم الدورانيّ لأنّ ذراع القوّة يقلّ.

عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا.

الثناقطبي المغناطيسيّ

المثال 20-12 عزم الازدواج على ملفّ

ملفّ دائري قطره 20.0 cm، ويحتوي على 10 لفات. التّيّار المار في كلّ لفّة هو 3.00A. إذا وضع هذا الملفّ في مجال مغناطيسيّ خارجي $B = 2.00\text{-T}$، فاحسب أقصى وأدنى عزم ازدواج يتأثر به الملفّ من المجال.

النّهج: تصلح المعادلة 20 – 10 لأيّ شكل مسطح من الملفّات بما فيها الملفات الدّائريّة. أقصى وأقلّ عزم ازدواج يحدد من الزاوية θ التي يصنعها الملفّ (العمودي على الملف) مع المجال المغناطيسيّ.

الحلّ: مساحة لفة واحدة من الملف هي

$$A = \pi r^2 = \pi(0.100\,\text{m})^2 = 3.14 \times 10^{-2}\,\text{m}^2$$

يظهر أقصى عزم ازدواج عندما يكون سطح الملف موازيًا للمجال، وتكون $\theta = 90^\circ$ (الشّكل 20 – 32 ج)، و $\sin\theta = 1$. وبالتعويض في المعادلة 20 – 10 نحصل على

$$\tau = NIAB\sin\theta = (10)(3.00\,\text{A})(3.14 \times 10^{-2}\,\text{m}^2)(2.00\,\text{T})(1) = 1.88\,\text{N}\cdot\text{m}$$

ويظهر أقلّ عزم ازدواج عندما يكون $\sin\theta = 0$، وعندها تكون $\theta = 0^\circ$. وعليه، $\tau = 0$ من (المعادلة 20 – 10).

ملحوظة: إذا كان الملفّ حرّ الدوران، فإنّه سيدور باتجاه الوضع الذي تكون فيه $\theta = 0^\circ$.

* 10-20 تطبيقات: الجلفانوميترات، والمحركات، ومكبرات الصوت.

* الجلفانوميترات

إنّ المكون الأساسي لأجهزة القياس الكهربائيّ (التي تحتوي على مؤشر وتدريج) كالأميترات، والفولتميترات، والأوميترات هو الجلفانوميتر. رأينا سابقًا (البند 19 – 8) كيفية تصميم هذه الأجهزة، وسنختبر الآن كيفية عمل الجلفانوميترات. كما هو واضح في (الشّكل 20 – 23)، فإنّ الجلفانوميتر يتكوّن من ملف من السلك، مع مؤشّر مرتبط به معلّق في مجالٍ مغناطيسيّ لمغناطيس دائم. عندما يمر تيار في الملفّ، فإنّه يتأثر بعزم ازدواج يساوي

$$\tau = NIAB \sin\theta$$

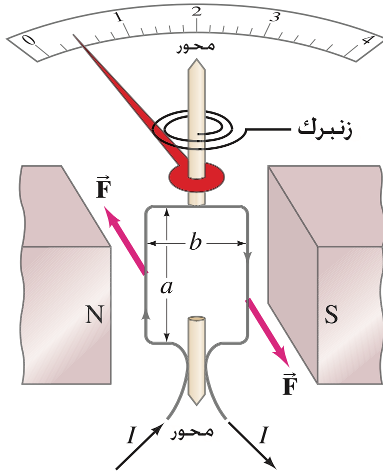
هذا العزم يعاكس بعزم مرونيّ لزنبرك مقداره τ_s، ويتناسب مع الزاوية ϕ التي يدور بها الزّنبرك (قانون هوك) ويكون

$$\tau_s = k\phi$$

حيث k معامل المرونة للزنبرك. الملف والمؤشر المرتبط به يدوران حتى يتعادل العزمان. عندما يصبح المؤشر ساكنًا في حالة اتزان، يكون العزمان متساويين: $k\phi = NIAB \sin\theta$، أو

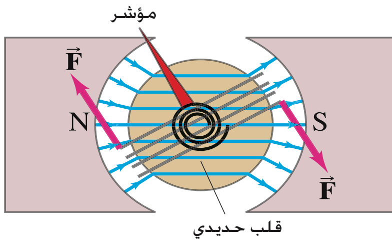
$$\phi = \frac{NIAB \sin\theta}{k}$$

يتناسب مقدار الزاوية ϕ (مقدار انحراف المؤشر) طرديًا مع التّيار I الذي يمرّ في الملفّ، ولكنه يعتمد أيضًا على الزاوية θ بين الملف والمجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$. وحتى يكون الجلفانوميتر أكثر فائدة: يجب أن تعتمد ϕ على التّيار I فقط، وليس على الزاوية θ. ولحلّ هذه المشكلة: علينا استخدام مغانط ذات أقطاب منحنية حول ملفّ يحيط بقلب حديديّ أسطوانيّ كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 34). يؤدّي الحديد إلى تكثيف خطوط المجال المغناطيسيّ، ويكون $\vec{\mathbf{B}}$ دائمًا موازيًا لوجه الملفّ. وتكون القوّة عموديّة على وجه الملف دائمًا ، كما أنّ العزم لا يتغيّر مع الزاوية. وهنا، تعتمد ϕ على التّيار فقط كما هو مطلوب.



الشّكل 20 – 33 جلفانوميتر

الشّكل 20 – 34 ملف جلفانوميتر ملفوف على قلب حديدي.

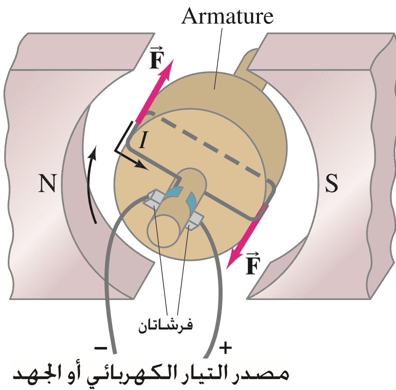


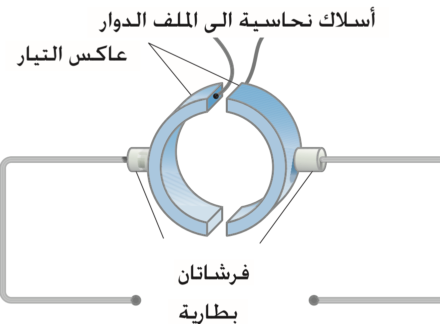
* المحرّكات الكهربائيّة

يحوّل المحرّكُ الكهربائيّ الطاقةَ الكهربائيّة إلى طاقةٍ ميكانيكية (دورانية). والمبدأ الذي يستند إليه في عمله هو المبدأ نفسه الذي يعمل به الجلفانوميتر باستثناء عدم وجود زنبرك. وعليه، يستطيع الملفّ الدوران المستمر باتّجاه واحد. ويكون الملفّ هنا أكبر، ويكون كذلك ملفوفا على أسطوانة أكبر تُسَمّى الدوار (r°t°r)، (الشّكل 20 – 35). في الوقع، هنالك عدة أنواع من المحركات: أحدها موضح في هذا الشّكل، حيث الدوار مثبت على عمود دوران. عندما يكون الدوار في الموقع الموضح في (الشّكل 20 – 35)، فإنّ المجال المغناطيسيّ يؤثر بقوى في الملفّ الذي يحمل التّيار كما يوضحه الشّكل. ومن جهة أخرى، عندما يمرّ الملفّ الذي يدور مع اتّجاه عقارب الساعة- (الشّكل 20 – 35) في الموقع الرأسيّ، فإنّ القوى تؤثر بحيث تعيد الملفّ بالاتّجاه المعاكس إذا بقي التّيار كما هو. ولكن إذا استطعنا عكس اتّجاه التّيار عند تلك اللحظة الحرجة بطريقة ما، فإنّ القوى تعكس اتّجاهها، ويستمر الملف بالدوران بالاتّجاه نفسه. لذا، فإنّ عكس اتّجاه التّيار بشكل دوري ضروريّ كي يستمر بالسريان باتّجاه واحد. ويمكن تحقيق هذا في المحرّكات ذات التّيار المستمر باستخدام ما يُسَمّى بعاكس التّيار مع فرشاتين كما هو موضح في (الشّكل 20 – 36). الفرشاتان تكونان ثابتتين باستمرار، وتحتكان مع عاكس التّيار المثبت على عمود الدوران. عند كلّ نصف دورة، يغير كلّ نصف من العاكس اتصاله مع الشفرة الأخرى. وأخيرا، فإنّ التّيار في الملفّ يعكس اتّجاهه كلّ نصف دورة ممّا يؤدي إلى استمرار الدوران.

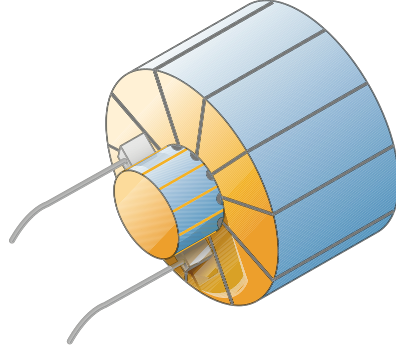
تطبيق الفيزياء
المحركات الكهربائيّة ذات التّيار المستمر

الشّكل 20 – 35 مخطط لمحرك dc بسيط





الشّكل 20 - 36 نظام العاكس والفرشاتان في المحرك ذي التّيار المستمر الذي يعمل على تغير اتجاه التّيار في الدوار لجعله يدور بشكل مستمر. يتصل العاكس مع محور دوران المحرك، ويدور معه، في حين تظلّ الفرشاتان ثابتتين.



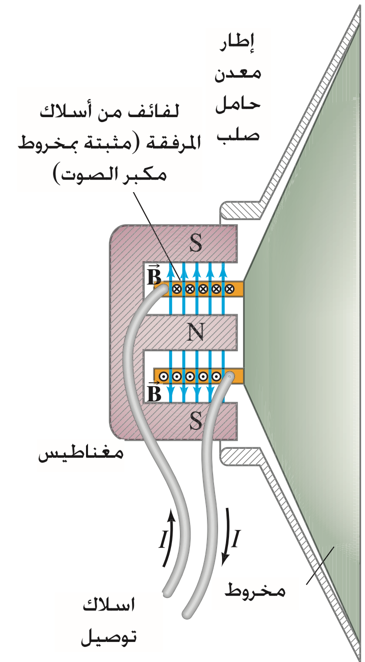
الشّكل 20 – 37 محرك كهربائيّ بعدة لفات

يحتوي كثيرٌ من المحرّكات على عدّة لفّات تُسمّى لفائف (*windings*) تثبت في أماكن مختلفة على الدوّار، (الشّكل 20 – 37). يمرّ التّيّار خلال كلّ ملفّ فقط في جزءٍ معيّن من الدورة، في الوقت الذي يعطي ترتيبه أقصى عزم دورانيّ. وبهذه الطريقة، ينتج المحرك عزمًا دورانيًّا أكثر ثباتًا من العزم الناتج من الملف المنفرد. يستطيع محرك التّيّار المتناوب (ac) أن يعمل دون عاكس للتيار، حيث يعكس التّيّار نفسه اتجاهه دوريًّا. وهناك الكثير من الحركات التي تستخدم اللفائف السلكية لإنتاج المجال المغناطيسيّ (المغانط الكهربائيّة). وفي الواقع، وإضافة إلى المغانط الدائمة، نجد أنّ تصميم معظم المحركات أكثر تعقيدًا ممّا شرحناه سابقًا، ولكن المبدأ العام لها يبقى متشابهًا.

تطبيق الفيزياء
المحركات الكهربائيّة ذات التّيّار المتناوب

* مكبرات الصّوت

يعمل مكبّر الصّوت أيضًا على مبدأ أنّ المغناطيس يؤثر بقوة في السلك الذي يحمل تيارًا. يوصل المخرج الكهربائيّ الستيريو أو التلفاز بسلك مع السماعة (*speaker*). ومصدر الصوت يوصل بملف سلكي يرتبط بمخروط السماعة، (الشّكل 20 – 38)، يصنع مخروط السماعة عادة من ورق مقوّى قاسٍ، ويوضع بحيث يتمكن من الحركة إلى الخلف وإلى الأمام بحريّة. ويوضع مغناطيس ثابت مباشرة على الخط مع الملفّ السّلكيّ. عندما يمرّ تيار متردد لإشارة صوتية خلال سلك الملف الذي يكون حرّ الحركة خلال المغناطيس، فإنّ الملف يتأثر بقوة تنتج من المجال المغناطيسيّ للمغناطيس. وعندما يتردد التّيّار بتردد مساوٍ لتردد الإشارة الصوتية، فإنّ الملف ومخروط السماعة المرتبط به يتحرك نحو الأمام والخلف بالتردد نفسه مسببًا انضغاطات وتخلخلات مترددة للهواء، مما ينتج موجات صوتية. وتعمل السماعة على تحويل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقة صوتية، وتعتمد ترددات الأمواج الصوتية الناتجة وكثافاتها بدقة على الإشارة الكهربائيّة المدخلة.



الشّكل 20 – 38 مكبر الصّوت

11-20 مطياف الكتلة

مطياف الكتلة هو أداة تستخدم لقياس كتل الذرات، ويستخدم اليوم في الكيمياء، والجيولوجيا، والأدوية لتحديد الذرات ونسبها في عينة معينة، إضافة إلى استخدامه في الفيزياء. كما هو واضح في (الشّكل 20 – 39)، فإنّ الأيونات تنتج بالتسخين أو بواسطة تيار كهربائيّ في المصدر أو العينة S، ثم تمر خلال شق S_1، ثم تدخل حيّزًا يحتوي مجالين متقاطعين: كهربائيّ ومغناطيسيّ. تتبع الأيونات مسارًا مستقيمًا في هذا الحيز إذا كانت القوّة الكهربائيّة qE (للأعلى على الأيونات الموجبة) تعادل القوّة المغناطيسيّة qvB (للأسفل على الأيونات الموجبة) وهنا يكون $qE = qvB$، أو

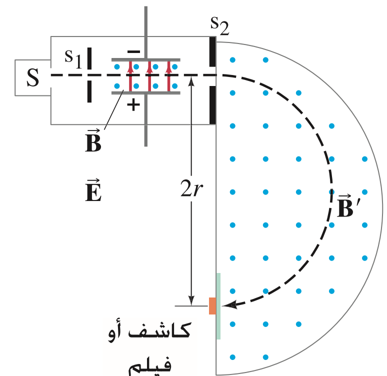
$$v = \frac{E}{B}$$

أمّا الأيونات التي تكون سرعتها $v = E/B$ فستمر دون انحراف خلال الشّقّ S_2 (يُسَمّى هذا الترتيب "منتقي السرعة"). في حيّزٍ أنصاف الدوائر بعد S_2 يكون لدينا مجال مغناطيسيّ فقط (B')، وتتحرك الأيونات في مسار دائريّ. ويظهر نصف قطر المسار الدائريّ من العلامة التي تتركها الأيونات عند اصطدامها بالغشاء (أو الكاشف) عندما يكون المجال B' ثابتًا. وعند تثبيت r بتثبيت الموقع على الكاشف، فإنّ B' يمكن تغييره إلى أن يظهر الكاشف. يطبق قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$ على الأيون الذي يتحرك بمسار دائريّ تحت تأثير المجال المغناطيسيّ B'. مما يعطينا $qvB' = mv^2/r$ أي:

$$m = \frac{qB'r}{v} = \frac{qBB'r}{E}$$

تطبيق الفيزياء
مطياف الكتلة

الشّكل 20 – 39 مطياف الكتلة المجالان المغناطيسيّان B وB' يشيران إلى خارج الورقة (يمثّلان بنقاط).



إنّ الكميّات الموجودة على يمين المعادلة كلّها معروفة، أو نستطيع قياسها. لذا، نستطيع إيجاد قيمة m.

تاريخيًّا، قيست كتلُ كثيرٍ من الذرات باستخدام هذه الطريقة. وعند استخدام عينة نقية، فإنّنا نجد أحيانًا علامات متقاربة على الغشاء. على سبيل المثال، ينتج النيون علامتين تعودان للذرات التي كتلها 20 و 22 وحدة كتل ذرية (u)، وبما أنّ الشوائب غير موجودة، فإنّنا نستنتج وجود نوعين من عنصر النيون بكتلتين مختلفتين. تُسَمّى هذه الأشكالُ المختلفة للعنصر النظائرَ (isotopes). وقد وُجد أنّ معظمَ العناصر خليطٌ من عدة نظائر، وأنّ الاختلاف في كتل هذه النظائر يعود إلى اختلاف عدد النيوترونات فيها (سيناقش هذا الموضوع في الفصل 30).

النظائر

المثال 20-13 مطياف الكتلة

وُجدتْ ذرات من الكربون ذي الوزن الذري 12.0 u مختلطة مع ذرات عنصر آخر غير معلوم. في مطياف كتلة ذي مجال مغناطيسيّ B' ثابت، كان نصف قطر مسار الكربون 22.4 cm، ونصف قطر مسار العنصر غير المعروف 26.2-cm. ما هو العنصر المجهول؟ افرض أنّ العنصرين لهما الشحنة نفسها.

النّهج: تمر ذرات كلّ من الكربون والعنصر المجهول خلال المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ نفسيهما. لذا، فإنّ كتلها تتناسب مع أنصاف أقطار المسارات التي تتبعها (انظر المعادلة السابقة).

الحلّ: تكتب النسبة بين الكتل من المعادلة السابقة كما يلي:

$$\frac{m_x}{m_C} = \frac{qBB'r_x/E}{qBB'r_C/E} = \frac{26.2\ \text{cm}}{22.4\ \text{cm}} = 1.17$$

أي أنّ، $m_x = 1.17 \times 12.0\ \text{u} = 14.0\ \text{u}$. وقد يكون العنصر المجهول هو النيتروجين (انظر الجدول الدوري على ظهر الغلاف الخلفي للكتاب).

ملحوظة: قد يكون العنصر المجهول أيضًا أحد النظائر، مثل نظير الكربون 14 ($^{14}_{6}C$). انظر الملحق B. وهنا نحتاج إلى مزيد من التحاليل الفيزيائية والكيميائية.

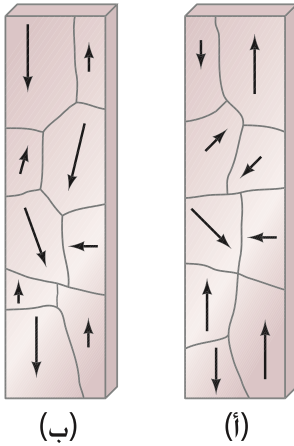
20-12 الفرّومغناطيسيّة: الحقول والتخلّف المغناطيسيّ

رأينا في (البند 20 - 1) أنّ الحديد وبعض المواد الأخرى يمكن تحويلها إلى مغانط قوية، حيث تُسَمّى هذه المواد فرّومغناطيسيّة.

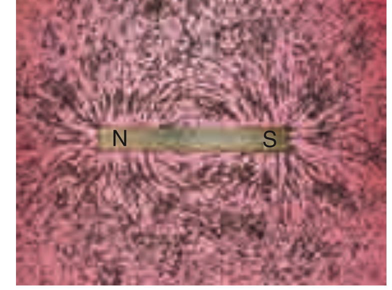
مصادر الفرّومغناطيسيّة

أظهرت الفحوصات المجهرية أنّ المغناطيس يتكون من أجزاء دقيقة تُسَمّى حقولا، تصل إلى نحو 1 mm في الطول والسمك على الأكثر. يتصرف كلّ حقل وكأنه مغناطيس دقيق ذو قطبين: شماليّ وجنوبيّ. في قطعة الحديد غير الممغنطة تكون الحقول موزعة بصورة عشوائية، (الشّكل 20 - 40أ). إنّ التأثيرات المغناطيسيّة لهذه الحقول تلغي بعضها بعضا، وبالتالي لا تشكل قطعة الحديد مغناطيسًا. وفي المغناطيس، تترتب الحقول باتجاه واحد كما هو واضح في (الشّكل 20 - 40ب) (إلى الأسفل في هذه الحالة). ويمكن صناعة المغناطيس من قطعة حديد غير ممغنطة بوضعها في مجال مغناطيسيّ قويّ (نستطيع أن نصنع مسمارًا مغناطيسيًا بدلكه برفق مع أحد أقطاب مغناطيس قويّ). وقد يدور اتجاه المغنطة للحقول حتى يصبح موازيا للمجال المغناطيسيّ الخارجي تقريبًا (قارن الشّكلين 20 - 40أ و ب)، وهذا يفسّر سبب جذب المغناطيس لقطع من الحديد كالمسامير ومشابك الورق. ويسبب المجال المغناطيسيّ ترتيبا خفيفا للحقول المغناطيسيّة في قطع الحديد بحيث تصبح مغناطيسًا، يكون قطبه الشّماليّ مواجهًا للقطب الجنوبيّ للمغناطيس الدائم وبالعكس مما يؤدي إلى التجاذب.

حقول



الشّكل 20 – 40 (أ) تتكوّن قطعة الحديد غير الممغنطة من حقول موزعة عشوائيًا. كلّ حقل يشبه مغناطيسًا دقيقًا، والسهم يشير إلى اتجاه المغناطيسيّة، ويكون رأس السهم باتجاه القطب الشّماليّ. (ب) تترتب الحقول في المغناطيس باتجاه واحد (إلى الأسفل في هذه الحالة)، وقد تكون متغيرة في الحجم بسبب عملية المغنطة.



الشّكل 20-41 خطوط المجال المغناطيسيّ لقطعة معدنية في مجال مغناطيسيّ دائم.

وبشكّل مشابه، إذا وقعت قطعة حديد مستطيلة في مجال مغناطيسيّ، فإنّها تكتسب ترتيبًا للحقول داخلها بحيث تعكس شكل المجال المغناطيسيّ (الشّكل 20 – 41). انظر أيضًا إلى صورة مقدمة هذا الفصل ص 554.

تستمرّ المغنطة في المغناطيس الحديدي لفترة زمنية طويلة، ويمكن اعتبار المغناطيس هنا وكأنّه مغناطيس دائم. ولكن إذا سقط المغناطيس على الأرض، أو ضُرب بمطرقة، فإنّ الحقول المغناطيسيّة تعود للترتيب العشوائيّ، وقد يفقد المغناطيس بعض مغناطيسيّته أو كلّها. إنّ زيادة درجة الحرارة يزيد من الحركة العشوائية للذرات مما يؤدي إلى زيادة عشوائية الحقول. ولكن لا يمكن صناعة مغناطيس فوق درجة حرارة معينة، تُسَمّى درجة كوري، (1043 K للحديد) أبدا؛ لأنّ المادة تفقد خصائصها المغناطيسيّة.

إنّ التشابه الفريد بين المجالات الناتجة من القضيب المغناطيسيّ والحلقة التي تحمل تيارًا والملف الحلزونيّ (الأشكال 20 – 4 ب، 20 – 9 و 20 – 3) يبين أنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من التّيّار يمكن أن يعمل شيئًا ما مع الفرّومغناطيسيّة. ووفقا للنظرية الذرية الحديثة، فإنّ الذرات التي تشكّل أيّ مادة يمكن تخيلها على أنها إلكترونات تدور حول نواة مركزية. الإلكترونات مشحونة، وتنشئ تيارًا كهربائيًّا يؤدي بالتالي إلى إنتاج مجال مغناطيسيّ. وتنتج الإلكترونات نفسها مجالا مغناطيسيًا إضافيًا لأنّها تبرُم (تغزل) حول محورها. إنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من بَرْم الإلكترون* حول نفسه هو المسؤول عن إنتاج الخصائص الفرّومغناطيسيّة في معظم المواد الفرّومغناطيسيّة.

ومن المسلّمات حاليّا أنّ المجالات المغناطيسيّة كلّها تنتج من التّيّار الكهربائيّ، وهذا يعني أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ تشكّل دائمًا حلقة مغلقة بعكس خطوط المجال الكهربائيّ التي تنطلق من الشحنات الموجبة وتنتهي بالشحنات السالبة.

تنويه:
تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ حلقة مغلقة. تبدأ خطوط المجال الكهربائيّ من الشحنات الموجبة وتنتهي بالسالبة.

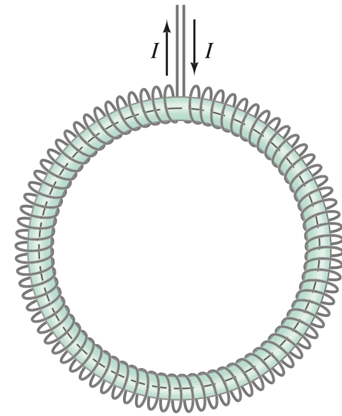
* النّفاذيّة المغناطيسيّة

إذا وضعت قطعة حديد داخل ملفّ حلزونيّ لعمل مغناطيس، فإنّ المجال المغناطيسيّ يزداد بشدة مقارنة بالمجال الناتج من الملفّ وحده. إنّ المجال المغناطيسيّ الكلّيّ هو مجموع الحدّين $\vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{B}}_0 + \vec{\mathbf{B}}_M$ ، حيث $\vec{\mathbf{B}}_0$ هو المجال النّاتج من التّيّار المار في الملفّ، و $\vec{\mathbf{B}}_M$ هو المجال الإضافيّ النّاتج من الحديد (أو أيّ مواد مغناطيسيّة موضوعة في قلب الملفّ). غالبًا $B_M \gg B_0$. إنّ المجال الكلي الناتج يمكن كتابته بتبديل الثابت μ_0 في المعادلة 20 – 8 $(B = \mu_0 NI/l)$ للملف الحلزونيّ) بالنّفاذيّة المغناطيسيّة μ، وهي من خصائص المادة المغناطيسيّة داخل الملف، ويكون $B = \mu NI/l$. وللمواد الفرّومغناطيسيّة، تكون قيمة μ_0 أكبر بكثير من قيمة μ_0. أمّا لبقية المواد، فتكون قريبة من قيمة μ_0.** إنّ قيمة μ ليست ثابتة للمواد الفرّومغناطيسيّة، ولكنها تعتمد على شدّة المجال الخارجي B_0 كما ستوضح لنا التجارب اللاحقة.

* التخلف المغناطيسي

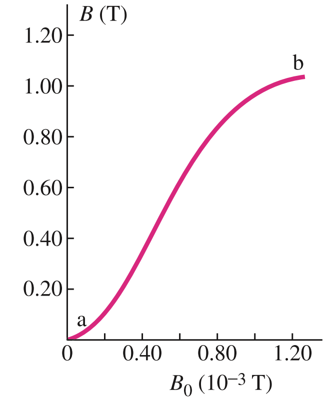
إذا أردنا إجراء تجارب على مواد مغناطيسيّة، فإنّنا نستخدم الملف الإطاريّ (toroid)، وهو ملفّ حلزونيّ طويل يُطوى على شكل إطار (الشّكل 20 - 42)، وتبقى خطوط المجال $\vec{\mathbf{B}}$ جميعها خلال الملفّ الإطاريّ. افرض أنّ لدينا ملفًّا إطاريًّا بقلب حديديّ، غير ممغنط مبدئيًّا، وليس هنالك تيار في الملفّ. إذا بدأنا بزيادة التّيّار تدريجيًّا، فإنّ المجال المغناطيسيّ الكلي B، والذي هو مجموع المجال الناتج من التيار الكهربائيّ فقط (B_0) والمجال الناتج من القلب الحديدي، يزداد أيضًا ولكنّه يتبع خطًّا منحنيًا موضحًا في (الشّكل 20 - 43). (لاحظ التدريجات المختلفة: $B \gg B_0$).

الشّكل 20 - 42 ملف إطاريّ ذو قلب حديديّ.

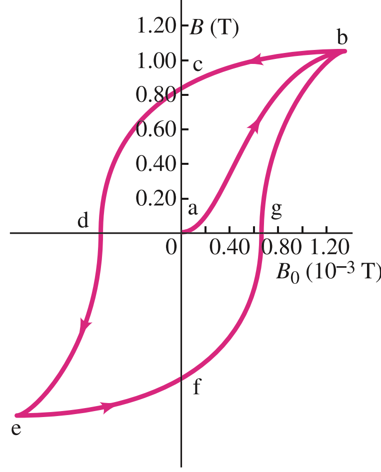


* الاسم بَرْم (sin) يأتي من الاقتراح القديم ان المجال المغناطيسي الإضافي يأتي من برم الإلكترون حول محوره (بالاضافة للدوران حول النواة) لينتج المجال الزائد. وعلى اي حال. فإن هذا الالكترون البارم هو نموذج مبسط جدًا ولا ينطبق (انظر الفصل 28).

** كل المواد هي **مواد مغناطيسية** قليلا. المواد غير المغناطيسية تقع ضمن صنفين أساسيين: (1) البارامغناطيسية وتتكون من ذرات لها عزم ثنا قطبي مغناطيسي محصل يصطف قليلًا تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي. كما في ملف الجلفانوميتر في (الشكل 20-33) والذي يتأثر بعزم يديره؛ (2) **مواد ديامغناطيسية** فيها ذرات لا تملك عزم ثنا قطبي محصل. لكن بوجود مجال مؤثر خارجي. فالإلكترونات التي تدور باتجاه معين تزداد سرعتها قليلًا. بينما الالكترونات التي تدور بالاتجاه المعاكس تقل سرعتها؛ والنتيجة هي اثر مغناطيسي قليل يعاكس المجال الخارجي.



الشّكل 20 - 43 المجال المغناطيسيّ الكلي B في ملف إطاري بقلب حديدي كدالة مع المجال الخارجي B_0 (B_0 ينتج من التيار الكهربائيّ I الناتج في الملف).



الشّكل 20 - 44 منحنى التخلف المغناطيسي

عند نقطة البداية، تكون الحقول موزعة عشوائيًّا داخل القلب الحديدي. وبزيادة قيمة B_0، تبدأ الحقول بالتّرتيب حتى تصبح كلّها مرتّبةً تقريبًا، وعند النقطة b، يكون الفلزّ هنا قد وصل إلى ما يُسمّى الإشباعَ. بعد ذلك، لو افترضنا أنّ التّيّار في الملفّ بدأ بالتناقص، فإنّ B_0 سيبدأ بالتناقص أيضًا. وإذا تناقص التّيّار (وكذلك B_0) إلى الصفر، النقطة c في (الشّكل 20 - 44)، فإنّ الحقول لا تصبح عشوائيّةً تمامًا، وتبقى بعض المغناطيسيّة الدائمة في القلب الحديديّ. وإذا زاد التّيّار بالاتّجاه المعاكس، فستتكوّن حقول كافية بحيث يساوي المجال الكلّيّ B صفرًا عند النقطة d. أمّا إذا استمر التّيّار بالزيادة بالاتّجاه المعاكس، فإنّ الحديد يصل إلى الإشباع في الاتّجاه المعاكس عند النقطة e. وأخيرًا، إذا نقص التّيّار مرّةً أخرى إلى الصفر، ثم بدأ بالزيادة باتّجاهه الأصلي، فإنّ المجال يتبع المسار $efgb$، وسيصل إلى نقطة الإشباع b مرة أخرى.

لاحظ أنّ المجال لا يمرّ بنقطة الأصل (النقطة a) في هذه الدورة، وهذه الحقيقة (عدم رجوع المنحنى من حيث بدأ بالمسار ذاته) تُسَمّى **التّخلّف المغناطيسيّ**. ويدعى المنحنى $bcde$-fgb **حلقةَ التّخلّفِ المغناطيسيّ**. في هذه الحلقة، يتحول جزء من الطاقة إلى طاقة حرارية (احتكاك) بسبب إعادة ترتيب الحقول. لاحظ أنّ القلب الحديديّ يتمغنط عند النقطتين c، و f حتى دون وجود تيّار في الملفات؛ هذه النقاط تعود لوجود مغناطيسيّة دائمة.

ملخص

للمغناطيس قطبان: شماليّ وجنوبيّ. القطب الشّماليّ هو الطرف الذي يشير إلى الشّمال الجغرافيّ عند تعليق المغناطيس تعليقًا حرًّا. الأقطاب المتشابهة للمغانط تتنافر، أمّا الأقطاب المختلفة فتتجاذب.

نستطيع تخيّل أنّ المجال المغناطيسيّ يحيط بأيّ مغناطيس. وحدة قياس المجال المغناطيسيّ هي التسلا (T $\equiv$ *tesla*).

تُنتج التّيّارات الكهربائيّة مجالات مغناطيسيّة. على سبيل المثال، تشكّل خطوطُ المجال المغناطيسيّ الناجّة من مرور تيار كهربائيّ في سلك مستقيم دوائرَ حول السلك، كما أنّ المجال يؤثّر بقوّةٍ في مغانط (أو تيارات) بالقرب منه. يؤثّر المجال المغناطيسيّ بقوّةٍ في التّيّار الكهربائيّ لسلكٍ مستقيمٍ طوله L ويحمل تيار I، والقوّة لها المقدار التالي (المعادلة 20– 1):

$$F = qvB\sin\theta$$

حيث θ هي الزاوية بين اتّجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ واتّجاه التّيّار. يكون اتّجاه القوّة عموديًّا على كلّ من السلك الذي يحمل التّيّار والمجال المغناطيسيّ، ويُحدّد من قاعدة اليد اليمنى. وتساعدنا المعادلة (20 – 1) في تعريف المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$.

وبشكلٍ مشابه، يؤثّر المجال المغناطيسيّ B بقوّة في شحنة q تتحرك بسرعة v . ومقدار هذه القوّة هو

$$F = IlB\sin\theta \qquad \textbf{(3-20)}$$

حيث θ هي الزاوية بين $\vec{\mathbf{v}}$، و $\vec{\mathbf{B}}$. اتّجاه $\vec{\mathbf{F}}$ عموديٌّ على كلّ من $\vec{\mathbf{v}}$، و $\vec{\mathbf{B}}$ (ويُحدّد أيضًا من قاعدة اليد اليمنى).

مسار الجسيمات المشحونة التي تتحرك عموديًّا على مجال مغناطيسيّ عبارة عن دائرة. مقدار المجال المغناطيسيّ الناتج من مرور تيار I في سلكٍ مستقيمٍ طويل وعلى مسافة r من السلك هو

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r} \qquad \textbf{(6 – 20)}$$

التّيّاران الماران في سلكين طويلين مستقيمين يؤثران بقوة في بعضهما من خلال المجال المغناطيسيّ الناتج من كليهما. التّيّاران المتوازيان بالاتّجاه نفسه يجذبان بعضهما، ولكنّهما يتنافران إذا كانا باتّجاهين متعاكسين . المجال المغناطيسيّ داخل ملفّ حلزونيّ هو

$$B = \mu_0 NI/l \qquad \textbf{(8-20)}$$

حيث N عدد اللفّات في الطول L من الملفّ و I هو التّيّار المار في كلّ حلقة.

* [ينصّ قانون أمبير على أنّه لأيّ مسار اختياري مغلق فإنّ مجموع حاصل ضرب كلّ قطعة من المسار في مركبة المجال $\vec{\mathbf{B}}$ الموازية لتلك القطعة يساوي μ_0 مضروبًا في التّيّار I المحصور بهذا المسار المغلق.

$$\Sigma B_{\parallel} \Delta l = \mu_0 I_{\text{encl}} \qquad \textbf{(9-20)}$$

* [العزم الدوراني τ على N من الحلقات التي يحمل كلّ منها تيارًا I، في مجال مغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ هو

$$\tau = NIAB \sin\theta \qquad \textbf{(11-20)}$$

القوّة أوالعزم الدورانيّ المؤثر في موصل يحمل تيارًا من المجال المغناطيسيّ يشكل مبدأ عمل الكثير من الأجهزة مثل الفولتميترات، والأميترات، والمحرّكات، ومكبّرات الصوت.]

[*يستخدم مطياف الكتلة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ لتحديد كتل الذرات.]

إنّ الحديد وبعض المواد الأخرى التي تُسمّى فرّومغناطيسيّة يمكن تحويلها إلى مغانط دائمةٍ قويّة. ويتكون هذا النوع من المواد من حقول يُعدّ كلٌّ منها مغناطيسًا دقيقًا، وتترتب هذه الحقول بحيث تصبح مغانط دائمة.

[* عندما يوضع الحديد أو أيّ مادة فرّومغناطيسيّة في مجال مغناطيسيّ B ناتج من تيار، فإنّ الحديد يتمغنط، وإذا زاد التّيّار بالاتّجاه المعاكس، فإنّنا نحصل على منحنى للمجال الكلّيّ كدالة مع المجال B_0 يُسمّى حلقة التخلّف المغناطيسيّ. وحقيقة أنّ المنحنى لا يرجع من حيث بدأ بالمسار نفسه تُسمّى التخلّف المغناطيسيّ.]

أسئلـــة

1. لا تكون إبرة البوصلة متزنة دائمًا بشكل موازٍ لسطح الأرض، ولكن إحدى نهايتيها قد تنحني للأسفل. فسّر ذلك.

2. ارسم خطوط المجال المغناطيسيّ المحيطة بسلكٍ أفقيٍّ مستقيمٍ يحمل تيارًا إلى اليسار.

3. بأيّ اتّجاه تكون خطوط المجال المغناطيسيّ لسلك مستقيم إذا حمل تيارًا يتجه بعيدًا عنك؟

4. مغناطيس على شكل حذاء الفرس مثبت رأسيًّا بحيث يكون قطبه الشّماليّ إلى اليسار، وقطبه الجنوبيّ إلى اليمين. إذا مرّ سلك في منتصف المسافة بين القطبيّن بحيث يحمل تيّارًا يتجه مباشرةً بعيدًا عنك، فبأيّ اتّجاه تكون القوّة المؤثّرة في السلك.

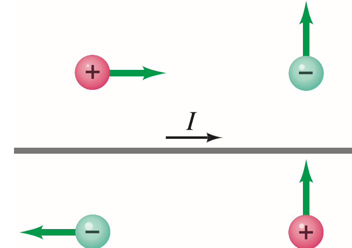
5. هل يجذب المغناطيس أيّ جسم فلزي، أم أنّه يجذب المواد المصنوعة من الحديد فقط ؟ (جرّب وسترى). ما سبب ذلك؟

6. قضيبان مغناطيسيّان يجذبان بعضهما إذا كانا على مسافةٍ قريبةٍ من بعضهما. هل يُعدّ كلٌّ منهما مغناطيسًا؟ فسّر ذلك.

7. يستطيع المجال المغناطيسيّ الناتج من التّيّار في الأسلاك الموجودة في منزلك التأثير في البوصلة. ناقش ذلك بدلالة التّيّار من حيث كونه تيارًا مستمرًّا أو متناوبًا.

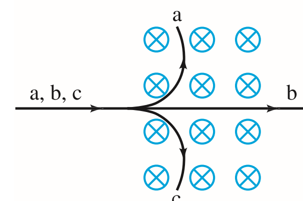
8. إذا دخلت شحنة سالبة منطقة مجال مغناطيسيّ متعامدٍ مع سرعتها. فهل تزداد الطاقة الحركية، أم تقلّ، أم تبقى ثابتة؟ فسّر إجابتك (أهمل الجاذبيّة، وافترض عدم وجود تيار كهربائيّ

9. في الشّكل 20 - 45، تتحرك عدة جُسيمات مشحونة بالقرب من سلك يحمل تيارًا. تمثل الأسهم اتجاه حركة كلّ جسيم، الإشارة + أو - تشير إلى إشارة الشحنة لكلّ جسيم. حدّد اتجاه القوّة المؤثّرة في كلّ جسيم من المجال المغناطيسيّ الناتج من السلك.



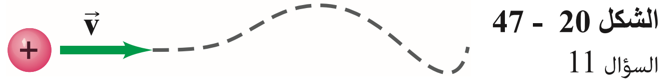
الشّكل 20 – 45
السّؤال 9

10. ثلاثة جُسيمات؛ a، و b، و c تدخل مجالًا مغناطيسيًّا كما يوضحه الشّكل 20-46. ما شحنة كلّ من هذه الجسيمات؟



الشّكل 20 – 46.
السّؤال 10

11. يتحرّك جسمٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ في مجال مغناطيسيّ غير منتظم حسب المسار الموضح في الشّكل 20 - 47. حدّد اتجاه المجال المغناطيسيّ في كلّ مكان من الفضاء مفترضا أنّ مسار الجسيم في مستوى الورقة دائمًا. وحدّد أيضا المقدار النسبي للمجال في كلّ جزء من الحركة.



الشكل 20 - 47
السؤال 11

12. هل يمكن لقضيب حديد أن يجذب مغناطيسًا؟ هل يمكن لمغناطيس أن يجذب قضيبًا حديديًّا. إلامَ تستند في إجابتك ؟

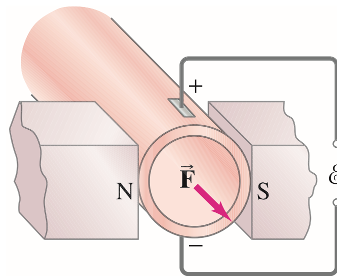
13. بيّن سبب التّشويش على الصورة عند وضع مغناطيس قوي بالقرب من شاشة التلفاز؟ وبيّن أيضًا تحوّل الصورة إلى سوداء تمامًا عند وضع مغناطيس أكثر قوة؟ (لا تحاول عمل ذلك حتى لا تتلف تلفازك).

14. لو افترضنا أنّ لديك ثلاثة قضبان حديدية: اثنان ممغنطان، والثالث غير ممغنط. كيف تستطيع تحديد الممغنطين دون استخدام أيّ أجسامٍ أخرى؟

15. هل تستطيع جعل إلكترون ساكن يتحرك باستخدام مجال مغناطيسيّ؟ وباستخدام مجال كهربائيّ؟ وضّح إجابتك

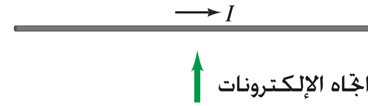
16. يتحرَّك جُسيمٌ مشحونٌ حركةً دائريّةً تحت تأثير مجالٍ مغناطيسيّ منتظم. إذا أثّر مجال كهربائيّ باتّجاه المجال المغناطيسيّ نفسه، فصِفِ المسار الذي سيتبعه هذا الجُسيم.

17. القوّة المؤثّرة في جسيم موضوع في مجال مغناطيسيّ هي فكرة ما يسمى بالمضخة الكهرومغناطيسيّة. تستخدم هذه المضخة في سحب سوائل تحتوي على فلزات (مثل الصوديوم) وضخّها في الدم في جهاز القلب الصناعي، المبدأ موضح في الشّكل 20 – 48. إذا أثّر مجال كهربائيّ عموديًّا في كلّ من الوعاء الدمويّ والمجال المغناطيسيّ، فوضّح كيف تدفع الأيونات للحركة. هل تعاني الأيونات الموجبة والسالبة من قوة بالاتّجاه نفسه؟



الشّكل 20 – 48
المضخة الكهرومغناطيسيّة للضخ في الوعاء الدموي، السؤال 17.

18. أُطلقت حزمة من الإلكترونات باتّجاه سلكٍ أفقيٍّ يحمل تيارًا من اليسار لليمين (الشكل 20 - 49). بأيّ اتّجاهٍ سوف تنحرف الحزمة؟



الشكل 20 – 49
السؤال 18

19. صفِ المجال الكهربائيّ و/ أو المغناطيسيّ الذي يحيط بشحنةٍ كهربائيّةٍ متحرّكة.

20. يتحرّك جُسيم مشحونٌ بخطٍّ مستقيمٍ في حيّزٍ معيّنٍ في الفضاء. فهل من الممكن أن يكون هنالك مجالٌ مغناطيسيٌّ في هذا الحيّز؟ إذا كان كذلك، فأعط وضعين ممكنين.

21. إذا انحرف جُسيمٌ مشحونٌ باتّجاهٍ ما في حيّزٍ من الفضاء، فهل نستطيع الاستنتاج أنّ $\vec{\mathbf{B}} \neq 0$ في هذا الحيّز، وضّح إجابتك؟

22. إذا كان لدينا مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظم $\vec{\mathbf{B}}$ في حيّزٍ معيّنٍ من الفضاء. خارج هذا الحيز $B = 0$. هل تستطيع أن تطلق إلكترونًا من الخارج باتّجاهٍ عموديٍّ على المجال بحيث يتحرك في مسارٍ دائريٍّ مغلقٍ في منطقة المجال؟ ماذا لو قذف الإلكترون بالقرب من المركز؟

23. كيف تستطيع تحديد أنّ الإلكترونات المتحركة في حيّزٍ معيّنٍ في الفضاء تنحرف بواسطة مجالٍ كهربائيٍّ، أو مجالٍ مغناطيسيٍّ، أو كليهما؟

24. كيف تستطيع صناعة بوصلة دون استخدام الحديد أو أيّ مادّةٍ فرّومغناطيسيّة؟

25. سلكان طويلان يحملان تيارين متساويين، I، بزاويةٍ قائمةٍ مع بعضهما، ولكنّهما لا يتلامسان. صفِ القوّة التي يؤثّر بها كلٌّ منهما في الآخر.

26. يحمل سلكٌ أفقيٌّ تيارًا حرَّ الحركة في مجال الجاذبيّة الأرضيّة. عُلّق مباشرةً وبشكلٍ موازٍ فوق سلك آخر يحمل تيارًا. (أ) بأيّ اتّجاهٍ يمرّ التّيار في السلك السفليّ؟ (ب) هل يمكن للسلك العلويّ أن يكون متزنًا بتأثير القوّة المغناطيسيّة للسلك السفلي؟ وضّح ذلك.

27. لماذا يجذب كلٌّ من قطبي المغناطيس قطعةً غير ممغنطةٍ من الحديد؟

28. المسمار غير المغنط لا يجذب مشابك الورق غير المغنطة. ومن جهةٍ أخرى، إذا اتصل أحد أطراف المسمار بمغناطيس، فإنّ الطرف الآخر سوف يجذب المشابك الورقية، فسّر ذلك.

29. أيونان لهما الكتلة نفسها، لكن أحدهما مؤيّن بضعف الشحنة للآخر. كيف سيختلف موقعهما على الغشاء في مطياف الكتلة؟

30. كيف سيتأثر المجال المغناطيسيّ داخل ملفٍّ حلزونيٍّ إذا ضاعفنا: (أ) قطر اللفات؟ (ب) المسافة بين اللفات؟ (ج) طول الملف مع مضاعفة عدد اللفات؟

31. هناك نوعٌ من المفاتيح المغناطيسيّة يشبه الملفَّ الحلزونيّ، ويُسمّى المفتاح التحكّمي (الشكل 20 - 50) وهو مغناطيسٌ كهربائيٌّ ملفوفٌ على قضيبٍ حديديٍّ ثابت. وعندما ينشط هذا المغناطيس، فإنّه يجذب قطعة فلزية على محور ارتكاز. صَمّمْ مفتاحَ تحكّم لفتح دائرة كهربائية وإغلاقها. يستخدم مفتاح التحكم عندما نحتاج إلى فتح دائرة ذات تيار كبير، ولكنّنا لا نريد لهذا التّيار أن يمرّ بالمفتاح الرئيس مثل مفتاح التشغيل في السيارة الذي يكون موصولا بمفتاح التحكّم. وبالتالي، فإنّ التّيار العالي اللازم للتشغيل لا يمرّ بالمفتاح الرئيس (الموجود على اللوحة أمام السائق).



الشكل 20 - 50 السؤال 31

مسائل

20 – 3 القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ

1. (I) (أ) ما مقدار القوّة المؤثّرة لكلّ متر في سلك مستقيم يحمل تيارًا مقداره 8.40-A عند وضعه عموديًّا على مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره 0.90-T؟ (ب) ما مقدار القوّة لكلّ متر، إذا كانت الزاوية بين السلك والمجال °45.0؟

2. (I) ما مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في 160-m من سلك مستقيم موصول بين برجين، ويحمل تيارًا مقداره 150-A. مقدار المجال المغناطيسيّ الأرضي 5.0×10^{-5} T ويصنع زاوية °65 مع السلك.

3. (I) ما مقدار التّيار الذي يمرّ في سلك طوله 4.80 m إذا كانت أقصى قوة تؤثر فيه 0.750 N عند وضعه في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره 0.0800-T؟

4. (II) سلك أفقي طوله 1.5-m يحمل تيارًا مقداره 4.5 A. عند تلك النقطة من سطح الأرض، يصنع المجالُ المغناطيسيّ الأرضي زاويةً مقدارها °38 مع السلك. احسب مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك من المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته 5.5×10^{-5} T عند تلك النقطة.

5. (II) أقصى قوة تؤثر في سلك يحمل تيارًا مقداره 8.75 A عند وضعه بين قطبين قطر كلّ منهما 55.5 cm هي 1.28 N. ما شدة المجال المغناطيسيّ بين القطبيّن تقريبًا ؟

6. (II) قِيس مقدار القوّة المغناطيسيّة لكلّ متر على سلك فكان 35% من قيمته القصوى الممكنة. ارسم العلاقة بين السلك والمجال عندما تكون القوّة أقصى ما يمكن، وارسم العلاقة عندما تكون القوّة المغناطيسيّة 35% من قيمتها القصوى بحساب الزاوية بين السلك والمجال المغناطيسيّ.

7. (II) أقصى قوة تؤثر في سلك عند وضعه بين قطبي مغناطيس هي 6.50×10^{-2} N. يمرّ التّيار بشكل أفقي إلى اليمين والمجال المغناطيسيّ رأسيّ للأعلى. إذا لوحظ أنّ السلك يتحرك باتّجاه المشاهد عند مرور التّيار فيه. (أ) ما نوع القطب المغناطيسيّ العلويّ؟ (ب) إذا كان قطر وجه كلّ قطب 10.0 cm، فاحسب التّيار المار في السلك إذا كان المجال 0.16 T. (ج) إذا مال السلك بحيث يصنع زاوية °10.0 مع الأفقي، فما القوّة المؤثّرة فيه هنا؟

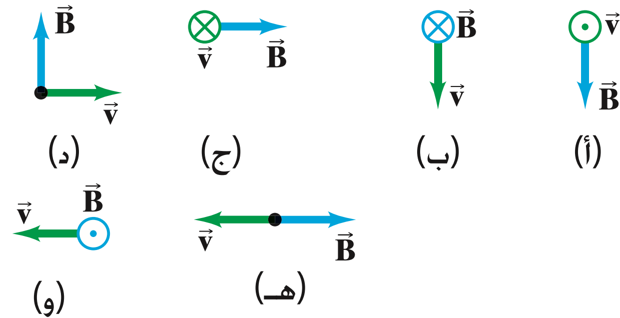
8. (II) افرض أنّ لديك سلكًا مستقيمًا من النحاس قطره 1.00 mm. يطفو أفقيًّا في الهواء بسبب القوّة المؤثّرة من المجال المغناطيسيّ الأرضي $\vec{\mathbf{B}}$ الذي يكون عموديًّا على السلك ومقداره 5.0×10^{-5} T. ما مقدار التّيار الذي يجب أن يحمله السلك؟ هل تبدو الإجابة مقبولة عمليًّا؟ وضّح باختصار.

4-20 القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ.

.9 (I) جُسيمات ألفا لها شحنة $q = +2e$، وكتلة $6.6 \times 10^{-27}\,kg$ انطلقت من مصدرٍ مشعٍّ بسرعةٍ مقدارها $1.6 \times 10^{7}\,m/s$. ما مقدار شدة المجال المغناطيسيّ اللازم لجعلها تتحرك في مسارٍ دائريٍّ نصف قطره $r = 0.25\,m$؟

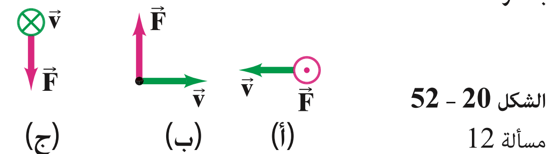
.10 (I) حدّد مقدار القوّة المؤثّرة واتّجاهها في إلكترون يتحرك أفقيًّا إلى الشّرق بسرعة $8.75 \times 10^{5}\,m/s$ عموديًّا على مجال مغناطيسيّ شدته $0.75\,T$ يؤثر للأعلى.

.11 (I) أوجد اتّجاه القوّة المؤثّرة في شحنةٍ سالبةٍ لكلّ حالة من الحالات الموضحة في الشّكل 20-51، حيث $\vec{v}$ (بالأخضر) هي سرعة الشّحنة، و $\vec{B}$ (بالأزرق) هو اتّجاه المجال المغناطيسيّ. (الإشارة ⊗ تعني أنّ المتجه عموديّ إلى الداخل، و ⊙ عموديّ للخارج باتّجاهك.



الشكل 20 – 51 مسألة 11

.12 (*I*) حدّد اتّجاه $\vec{B}$ لكلّ حالة من الحالات الموضحة في الشّكل 20-52 حيث تمثل $\vec{F}$ أقصى قوة مؤثرة في الشحنة الموجبة التي تتحرك بسرعة $\vec{v}$.



الشكل 20 - 52 مسألة 12

.13 (I) انطلق إلكترون عموديًّا نحو الأعلى بسرعة $1.70 \times 10^{6}\,m/s$ باتّجاه مجال مغناطيسيٍّ منتظم شدّته 0.20-T باتّجاهٍ أفقيٍّ بعيدًا عن المشاهد. صف مسار الإلكترون في هذا المجال.

.14 (I) يدخل بروتون طاقته الحركية 5.0-MeV عموديًّا إلى منطقة مجال مغناطيسيّ شدته 0.20-T. ما نصف قطر مسار البروتون؟

.15 كانت أقصى قوّة يتعرض لها هي $1.70 \times 10^{6}\,m/s$ للأعلى نتيجة دخول منطقة مجال مغناطيسيّ. فما مقدار المجال المغناطيسيّ واتّجاهه ؟

.16 (II) كم سرعة حزمة من الإلكترونات تمرُّ دون انحرافٍ في منطقة مجالين كهربائيٍّ ومغناطيسيٍّ مقدارهما $8.8 \times 10^{3}\,V/m$ و $3.5 \times 10^{-3}\,T$، على الترتيب؟ ما نصف قطر مسار الإلكترون إذا أبعدنا المجال الكهربائيّ؟

.17 (II) أيون الهيليوم He^{+2} كتلته $6.6 \times 10^{-27}\,kg$، يتسارع بواسطة فرق جهد مقداره 2100 V. (أ) ما نصف قطر مساره إذا تحرّك في مستوىً عموديّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدّته 0.340-T؟ (ب) ما الزمن الدوري لحركته؟

.18 (II) بروتون (كتلته mp) وديوترون $(m = 2m_p,\ Q = e)$ وجُسيم ألفا $(m = 4m_p,\ Q = 2e)$ تتسارع بفرق الجهد V نفسه، ثم تدخل مجالًا مغناطيسيًّا $\vec{B}$ حيث تتحرّك بمساراتٍ دائريّةٍ عموديّةٍ على $\vec{B}$. حدّد نصف قطر مساري الديوترون وجُسيم ألفا بدلالة نصف قطر مسار البروتون.

.19 (II) اثبت أنّ الزمن الدوري (T) للحركة الدائرية لجُسيم يتحرّك بسرعةٍ ثابتةٍ v عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم $\vec{B}$ هو

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

[مساعدة: انظر المثال 20 – 5 والفصل الخامس]

.20 (II) يتحرك جُسيم شحنتُه q في مسار دائري نصف قطره r في مجال مغناطيسيّ منتظم B. أثبت أنّ كمية تحرك الجسيم هي $p = qBr$.

.21 (II) يتحرك جُسيم كتلتُه m، وشحنته q في مسار دائري في مجال مغناطيسيّ B. أثبت أنّ طاقته الحركية تتناسب مع r^2 (مربع نصف قطر مسار الجُسيم).

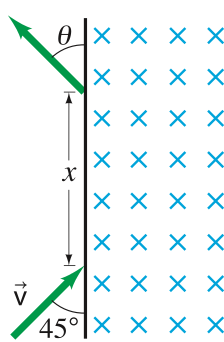
.22 (II) اثبت أنّ كمية التحرك الزاوية للجسيم في التمرين 21 هي $L = q\,Br^2$ حول مركز الدائرة.

.23 (III) تتحرّك رصاصةٌ كتلتها 3.40-g بسرعة مقدارها 160 m/s عموديًّا على المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي شدته $5.00 \times 10^{-5}\,T$. إذا حملت الرصاصة شحنة مقدارها $13.5 \times 10^{-9}\,C$، فكم المسافة التي ستنحرفها عن مسارها بسبب المجال المغناطيسيّ الأرضي بعد أن تتحرك مسافة 1.00 km؟

.24 (III) افرض أنّ المجال المغناطيسيّ الأرضيّ عند خط الاستواء يساوي $0.40 \times 10^{-4}\,T$ باتّجاه الشّمال عند كلّ النقاط. احسب سرعة أيون اليورانيوم $(m = 238\,u,\ q = e)$ ليدور حول الأرض على ارتفاع 5.0km عن خطّ الاستواء. هل تستطيع إهمال المجال الجاذبيّة الأرضية؟

.25 (III) يتحرك بروتون بسرعة $v = 2.0 \times 10^{5}\,m/s$ في منطقة خالية من المجالات إلى أن يدخل مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا شدته $B = 0.850\,T$ $(\vec{B} \perp \vec{v})$. إذا دخل البروتون منطقة المجال بزاوية ˚45 كما هو موضح في الشّكل 20 – 53 (أ) بأيّ زاوية سيغادر المجال؟ (ب) على أيّ مسافة x سيخرج من المجال؟

2.0 × 10 m s in a



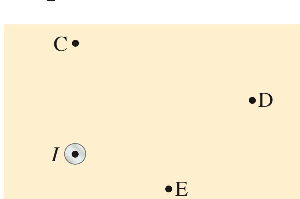
الشكل 20 - 53 مسألة 25

20 – 5، و 20 – 6 المجالُ المغناطيسيّ الناتج من سلك مستقيم يحمل تيّارًا. القوّة بين سلكين

.26 (II) يحمل كيبل تيّارًا مقداره 65-A، ما مقدار المجال المغناطيسيّ على مسافة 6.0 m عنه؟ قارن النتيجة مع مقدار المجال المغناطيسيّ الأرضيّ.

.27 (I) إذا أردنا استخدام سلك كهربائيّ لإنتاج مجال مغناطيسيّ لا يزيد على المجال المغناطيسيّ الأرضيّ $(0.55 \times 10^{-4}\,T)$ على مسافة 25 cm، فما أقصى تيار يمكن أن يحمله السلك؟

.28 (I) في الشّكل 20 - 24، سلك طويل يحمل تيارًا I خارج من الصفحة باتّجاهك. حدد بسهم مناسب اتّجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$عند كل نقطة من النقاط C، و D، و E في مستوى الورقة.



الشكل 20 – 54 مسألة 28

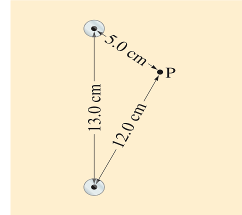
.29 (I) يحمل سلكٌ مستقيمٌ عموديٌّ تيّارًا للأعلى مقداره 24-A، ويؤثر بقوة لوحدة الأطوال مقدارها $8.8 \times 10^{-4}\,N/m$ في سلك آخر موازٍ له ويقع على مسافة 7.0 cm بعيدًا عنه. ما التّيّار (بالمقدار والاتّجاه) الذي يمرّ في السلك الثاني؟

.30 (I) احسب مقدار القوّة المتبادلة واتّجاهها بين سلكين طول كلّ منهما 35 m، ويقعان على مسافة 6.0 cm عن بعضهما، ويحمل كلٌّ منهما تيّارًا مقداره 25A بالاتّجاه نفسه.

31. (II) أجريت تجربة على المجال المغناطيسيّ الأرضي على بعد 1.00 m من كيبل كهربائيّ. ما أقصى تيار مسموح يمكن أن يمرّ في الكيبل حتى تكون دقة التجربة $\pm 1.0\%$؟

32. (II) سلك قدرة يحمل تيارًا مقداره 95A على قمة أعمدة ارتفاعها 8.5-m. ما مقدار المجال المغناطيسيّ على سطح الأرض؟ كيف تقارن هذه النتيجة بالمجال المغناطيسيّ الأرضيّ الذي يساوي $\frac{1}{2}$ G تقريبًا؟

33. (II) سلكان طويلان متوازيان يبعدان 13.0 cm عن بعضهما ، ويحمل كلّ منهما تيارًا مقداره 25-A بالاتجاه نفسه. احسب المجال المغناطيسيّ عند النقطة p التي تبعد 12 cm عن الأول و 5 cm عن الثاني (الشّكل 20 – 55).



الشّكل 20 – 55
مسألة 33

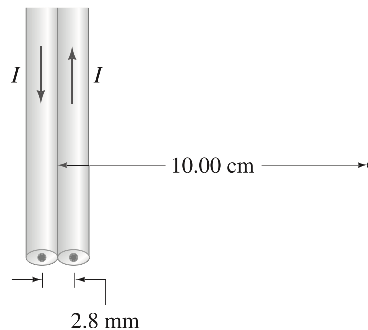
34. (II) بوصلة أفقية تقع على مسافة 18 cm جنوب سلك مستقيم عموديّ يحمل تيارًا مقداره 35-A للأسفل. بأيّ اتجاه ستشير إبرة البوصلة عند هذا الموقع؟ افرض أنّ المركبة الأفقية للمجال المغناطيسيّ الأرضيّ عند هذا النقطة تساوي 0.45×10^{-4} T والميل المغناطيسيّ يساوي °0.

35. (II) سلك أفقيّ طويل يحمل تيارًا مقداره 22.0 A باتجاه الشّمال. ما المجال المغناطيسيّ الكليّ عند نقطة تقع على مسافة 20.0 cm غرب السلك إذا كان المجال المغناطيسيّ الأرضيّ يشير إلى الشّمال وبزاوية °37 للأسفل، ومقداره يساوي 5.0×10^{-5} T؟

36. (II) سيل من البروتونات يجتاز نقطة معينة في الفضاء بمعدل 1.5×10^{9} بروتون/ ثانية. ما المجال المغناطيسيّ الناتج على مسافة 2.0 m منها؟

37. (II) احسب المجال المغناطيسيّ عند منتصف المسافة بين سلكين مستقيمين طويلين المسافة بينهما 2.0 cm بدلالة التّيار I الذي يمرّ في أحد السّلكين، أما التّيار في السلك الثاني 15A. افرض أنّ التّيارين: (أ) بالاتجاه نفسه. (ب) باتجاهين متعاكسين

38. (II) زوج من الأسلاك في كيبل يحملان تيارًا مستمرًا مقداره 25.0 A من جهاز معيّن وإليه. إذا كان السّلكان معزولين، وقطراهما مهملين، ويبعدان 2.8 mm عن بعضهما، فما المجال المغناطيسيّ على مسافة تبعد 10.00 cm عن منتصف المسافة بينهما (الشّكل 20 – 56)؟ قارن النتيجة بالمجال المغناطيسيّ الأرضيّ.

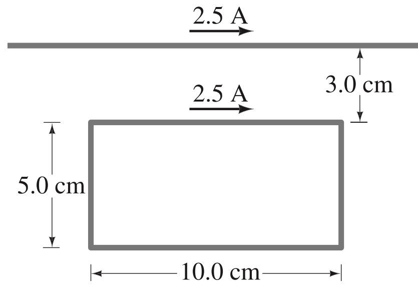


الشّكل 20 – 56
مسألتان 38، و 39

39. (II) يقع سلك ثالث في مستوى السلكين المبينين في (الشّكل 20 – 56) على مسافة 2.8 mm من السلك الأيمن وموازيًا لكليهما. ما القوّة لوحدة الأطوال التي يؤثر بها هذا السلك في كلا السلكين؟

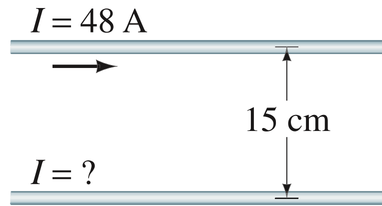
40. (II) تشير إبرة بوصلة بزاوية °23 باتجاه الشّمال الشرقي خارج العمران. وعند وضعها على مسافة 12.0 cm شرق سلك عمودي داخل عمارة، فإنّها تشير بزاوية °55 باتجاه الشّمال الشرقي. ما مقدار التّيار المار في السلك واتجاهه ؟ المجال المغناطيسيّ في ذلك المكان أفقيّ ومقداره 0.50×10^{-4} T.

41. (II) تقع حلقة مستطيلة من سلك في المستوى نفسه لسلك مستقيم كما هو واضح في (الشّكل 20 – 57). إذا مرّ تيار مقداره 2.5A في كليهما، فاحسب مقدار القوّة المؤثّرة في الحلقة واتجاهها.



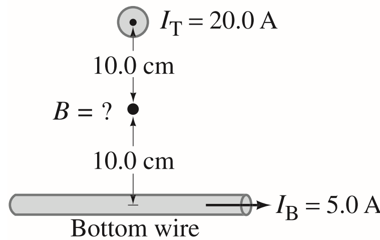
الشّكل 20 – 57 مسألة 41

42. (II) يحمل سلك أفقيّ طويل تيارًا مقداره 48 A. وهناك سلك ثانٍ قطره 2.5-mm مصنوع من النحاس متزن على مسافة 15 cm تحت السلك الأول (الشكل 20 – 58) (أ) أوجد مقدار التّيار المار في السّلك السفليّ واتجاهه. (ب) أعد حلّ الفرع أ إذا كان السّلك الثاني متزنًا على مسافة 15 cm فوق السّلك الأول.



الشّكل 20 – 58 مسألة 42

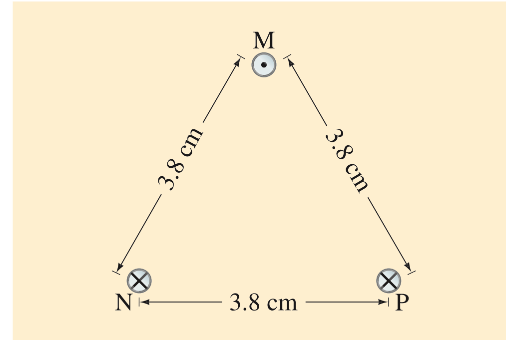
43. (II) سلكان مستقيمان طويلان متعامدان على بعضهما، والمسافة العموديّة بينهما عند أقرب نقطة 20.0 cm (شكل 20 – 59)، ما مقدار المجال المغناطيسيّ عند نقطة تقع في منتصف المسافة العموديّة بينهما، إذا كان السّلك العلويّ يحمل تيارًا مقداره 20.0 A، في حين يحمل السّلك السفليّ تيارًا مقداره 5.0 A.



الشّكل 20 – 59 مسألة 43

44. (II) سلكان طويلان متوازيان، المسافة بينهما 15 cm، السلك A يحمل تيّارًا مقداره 2.0 A، أمّا السلك B فيحمل تيّارًا مقداره 4.0 A بالاتجاه نفسه. (أ) احسب المجال المغناطيسيّ الناتج من السلك A في موقع السلك B. (ب) احسب المجالَ المغناطيسيَّ الناتج من السلك B في موقع السلك A. (ج) هل هذان المجالان متساويان ومتعاكسان في الاتجاه؟ لماذا؟ (د) احسب القوّة المؤثّرة في السلك A من السلك B، وكذلك القوّة المؤثّرة في السلك B من السلك A. هل هاتان القوتان متساويتان ومتعاكستان في الاتجاه؟ لماذا؟

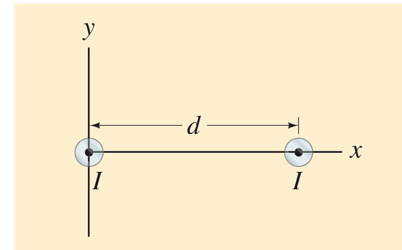
45. (II) ثلاثةُ أسلاكٍ طويلةٍ متوازيةٍ يبعد كلٌّ منها عن الآخر مسافة 3.8 cm (تبدو وكأنّها على رؤوس مثلثٍ متساوي الأضلاع) التّيّار المارّ في كلّ منها يساوي 8.00 A، ولكن اتجاهها في السلك M معاكس لكلا السلكين N، و P. احسب القوّة المغناطيسيّة لوحدة الأطوال المؤثّرة في كلّ سلك من السلكين الآخرين.



الشكل 20 – 60 مسائل 45، و 46، و 47

46. (II) في (الشّكل 20 – 60)، احسب مقدار المجال المغناطيسيّ واتجاهه عند النقطة التي تقع في منتصف المسافة بين السلكين N، و M.

47. (II) سلكان طويلان متوازيان، المسافة بينهما d، يحملان التّيّار I نفسه وبالاتجاه ذاته. إذا كان أحد السلكين عند $x = 0$، والثاني عند $x = d$ (الشّكل 20 – 61)، فاحسب $\vec{\mathbf{B}}$ على محور السّينات بين السّلكين كدالة في x.



الشكل 20 – 61 مسألة 47

20 – 7 الملفّ الحلزونيّ والمغانط الكهربائيّة

48. (I) ملفٌّ حلزونيٌّ طوله 12-cm، وعدد لفاته 420 لفةً، يحمل تيّارًا مقداره 2.0 A. احسب المجال المغناطيسيّ داخل الملف بالقرب من مركزه.

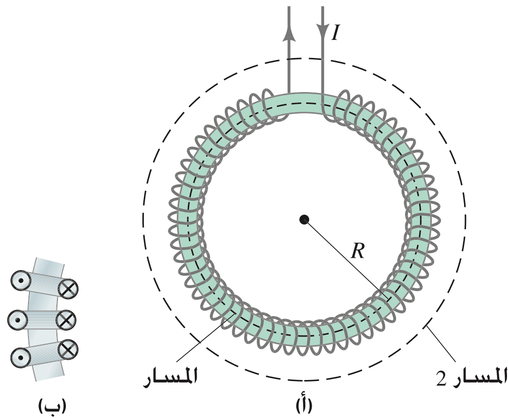
49. (I) ملفٌّ حلزونيٌّ طوله 30.0 cm، وقطره 1.25 cm، ينتج مجالًا مغناطيسيًا في مركزه مقداره 0.385 T. ما مقدار التّيّار اللازم مروره في الملفّ إذا كان عدد لفاته 975 لفة من السلك؟

50. (II) ملفٌّ حلزونيٌّ عدد لفاته 550 لفةً، وطوله 15 cm، يمرّ به تيّارٌ مقداره 33A. وضع سلك مستقيم طوله 3.0 cm، ويحمل تيّارًا مقداره 22A للأسفل في مركز الملفّ الحلزونيّ. ما القوّة المؤثّرة في هذا السلك على أنّ مجال الملفّ الحلزونيّ باتجاه الشرق؟

51. (II) إذا كان لديك 1.0 kg من النحاس، وتريد أن تصنع ملفًّا حلزونيًّا بحيث يعطي أقصى مجالٍ مغناطيسيٍّ ممكن عند فرق جهد معين، فهل ستصنع الأسلاك بحيث تكون سميكة قصيرة، أم رفيعة طويلة، أم أيّ شكل آخر؟ خذ بالحسبان المتغيّرات الأخرى، كقطر الملفّ الحلزونيّ وطوله، وأيّ أمور أخرى.

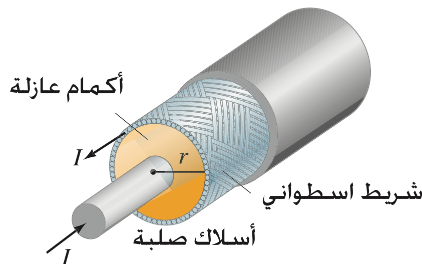
* 20 – 8 قانون أمبير

* **52.** (II) الملفُّ الإطاريُّ هو ملفٌّ حلزونيٌّ دائريّ الشّكل (الشّكل 20 – 62). استخدم قانون أمبير والمسار الدائريّ الموضّح بالخطوط المتقطعة في (الشّكل 20 – 62)أ لإثبات أنّ المجال المغناطيسيّ: (أ) داخل الملفِّ الإطاريّ هو $B = \mu_0 NI/2\pi r$، حيث N العدد الكلّيّ للفّات. (ب) خارج الملفّ الإطاريّ $B = 0$. (ج) هل المجال داخل الملف الإطاريّ منتظم كما في الملفّ الحلزونيّ؟ إنْ لم يكن كذلك، فكيف يتغيّر؟



الشكل 20 – 62 مسألة 52 (أ) ملف إطاري (ب) مقطع من الملفّ الإطاريّ يرينا اتجاه التّيّار في ثلاث حلقات: ⊙ تعني أنّ التّيّار باتجاهك، و ⊗ تعني أنّ التّيّار بعيدًا عنك.

* **53.** (III) (أ) استخدم قانون أمبير لإثبات أنّ المجال المغناطيسيّ لكيبل ذي موصلين متّحدي المحور ($c^{o}axial\ cable$). كما في (الشّكل 20 – 36) يساوي $B = \mu_0 I/2\pi r$ إذا كان r أكبر من نصف قطر السلك الداخلي، وأقلّ من نصف قطر بديلة السلك الأسطوانية الخارجية. (ب) أثبت أنّ $B = 0$ خارج هذا الكيبل.



الشكل 20 – 63 الكيبل ذو الموصلين متحدي المحور (c^{o}axial cable)

* 20 – 9، و 20 – 10 عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا والتطبيقات

* **54.** حلقةٌ سلكيّةٌ مربّعةٌ، طول ضلعها 54، وحلقةٌ سلكيّةٌ مربَّعةٌ أخرى، طول ضلعها 22.0 cm تقع بحيث يكون وجهها موازيًا لمجال مغناطيسيٍّ بين قطبي مغناطيسٍ كبير الحجم. إذا مرّ تيّارٌ مقداره 6.30 A خلال الحلقة، فإنّ عزم الازدواج عليها يساوي 0.325 m · N، فما شدة المجال المغناطيسيّ؟

* **.55** (I) إبرة جلفانوميتر تنحرف لأقصى تدريج عند تيّارٍ مقداره $53.0\text{-}\mu A$. ما مقدار التّيّار الذي سيمرّ بها حتى تنحرفَ لأقصى تدريج إذا ضوعف المجال المغناطيسيّ ليصبح 0.860 من قيمته الأصلية؟

* **.56** (I) إذا كان زنبرك الإرجاع يضعف بنسبة 25% مع السنوات. ما التّيّار الذي سيعطي أقصى انحراف للتدريج إذا كانت القيمة الأصلية اللازمة له $36\,\mu A$؟

* **.57** (I) إذا قلّ التّيّار في محرك كهربائيّ بنسبة 12%، فما المعامل الذي سيتناقص به عزم الازدواج؟

* **.58** (II) اثبت أنّ الثناقطبيّ المغناطيسيّ M لإلكترون يدور حول النواة التي تحتوي على بروتون فقط في ذرة الهيدروجين يرتبط بكمية التحرك الزاوية L للإلكترون حسب العلاقة

$$M = \frac{e}{2m}L$$

* **.59** (II) ملفٌّ دائريٌّ قطره 16.0 cm، ويحتوي على تسع لفّات، يقع في مستوى سطح الأرض. إذا كان المجال المغناطيسيّ الأرضي في هذا الموقع 5.50×10^{-5} T باتّجاه الأرض وبزاوية $56.0°$ تحت الخط الذي يشير إلى اتّجاه الشّمال إذا مرّ تيار قيمته 7.20-A مع اتجاه عقارب الساعة خلال الملف: (أ) احسب عزم الازدواج على الملف. (ب) أيّ حافة من حواف الملف سترتفع للأعلى: الشّماليّة، أم الشرقية، أم الجنوبيّة، أم الغربية؟

20 – 11 مطياف الكتلة

* **.60** (I) تتحرك بروتونات بدائرة نصف قطرها 5.10 cm في مجال مغناطيسيّ شدته 0.566-T. ما قيمة المجال الكهربائيّ اللازم لجعل مساره مستقيمًا؟ وبأيّ اتّجاه يجب أن يكون؟

* **.61** (I) يكون لذرات الجرمانيوم في مطياف الكتلة أنصاف أقطار مساوية لـ 21.0، و21.6، و21.9، و22.2، و 22.8 cm . إذا كان أقصى نصف قطر يعود للكتلة الذرية $76u$. ما الكتل الذرية للنظائر الأخرى؟

* **.62** (II) لو فرضنا أنّ المجال الكهربائيّ بين اللوحين في مطياف الكتلة الموضح في (الشّكل 20 - 39) هو 2.48×10^4 V/m. والمجالان المغناطيسيّان $B = B' = 0.68$ T. إذا كان المصدر يحتوي على نظائر الكربون ذات العدد الكتلي 12، و13، و14 من قطعةٍ قديمةٍ من الشجر. (لحساب الكتلة الذرية، اضرب في 1.67×10^{-27} kg. كم ستبعد الإشارات التي تتكون على الغشاء في مطياف الكتلة بعضها عن بعض؟ وماذا ستكون هذه المسافة إذا كانت الأيونات ثنائية الشحنة؟

* **.63** (II) يُستخدم مطيافُ الكتلة لقياس تلوّث الهواء. من الصعب فصل الجزيئات التي لها كتلٌ متساويةٌ تقريبًا مثل CO (28.0106 u)، و N_2 (28.0134 u). كم يجب أن يكون نصف قطر تقعر المطياف إذا أردنا أن نفصل هذين الجزأين على الغشاء بمسافة 0.50 mm؟

* **.64** (II) أحد أشكال مطياف الكتلة يعمل على مسارعة الأيونات بفرق جهد V قبل دخولها منطقة المجال المغناطيسيّ B حيث تبدأ الأيونات الحركة من السكون. أثبت أنّ كتلة الأيون هي $m = qB^2R^2/2V$، حيث R هي نصف قطر مسار الأيون في المجال المغناطيسيّ وq هي شحنته.

20 – 12 الفرّومغناطيسيّة والتخلّف المغناطيسيّ

* **.65** (I) ملفٌّ حلزونيٌّ رفيعٌ، يحتوي 430 لفةً في المتر الواحد، ويمرّ به تيارٌ مقداره 25-A. إذا كانت النّفاذيّة المغناطيسيّة للحديد $3000\mu_0$، فاحسب المجالَ المغناطيسيّ الكلّيّ داخلَ الملفِّ الحلزونيّ؟

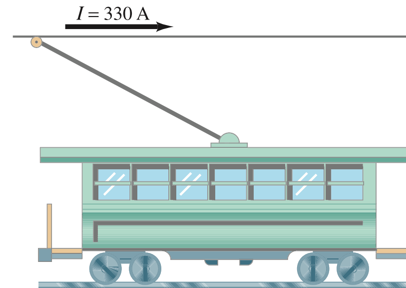
* **.66** (II) ملفٌّ حلزونيٌّ بقلبٍ حديديٍّ، طوله 38 cm، وقطره 1.8 cm، وعدد لفّاته 640 لفةً. إذا كان المجال المغناطيسيّ داخله 2.2 T عندما يمرّ به تيار مقداره 48 A. فاحسب النّفاذيّة المغناطيسيّة عند هذا المجال ذي الشدة العالية.

مسائــل عامة

.67 تنحرف حزمةٌ من البروتونات، كميّةُ تحرّكها 4.8×10^{-16} kg·m/s مــع اتجــاه عقارب الســاعة في مســار دائريّ قطــره 2.0km في المختبــرات التابعة لمســارع فيرمي العالمي في إلينــوي في الولايات المتحدة الأمريكيــة. حدّد مقدار المجال المغناطيســيّ الذي يحيط بالأنبوب الذي يحتوي الحزمة واتّجاهه.

.68 بروتون وإلكترون لهما الطاقة الحركية نفسها يدخلان منطقة مجال مغناطيسيّ منتظم. ما النسبة بين نصفي أقطار مساريهما الدائريين؟

.69 كيبل القدرة لعربة كهربائية (الشّكل 20 – 64) يحمل تيارًا أفقيًّا مقداره 330 A باتّجاه الشرق. شدة المجال المغناطيسيّ عند هذا الموقع 5.0×10^{-5} T، ويصنع زاوية انحراف مقدارها $22°$. احسب مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في 15-m من هذا الكيبل واتّجاهها.



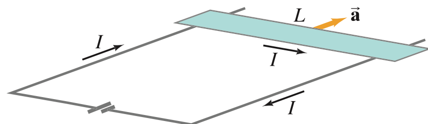
الشكل **20 - 64**
مسألة 69

.70 احسب القوّة المؤثّرة في طائرة تكتسب شحنة كلية مقدارها $1550\,\mu C$، وتتحرك بسرعة 120 m/s عموديًّا على المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته 5.0×10^{-5} T.

.71 يشير المجالُ المغناطيسيُّ الأرضيُّ بالقرب من خطِّ الاستواء بشكلٍ أفقيٍّ نحو الشّمال تقريبًا، وقيمته $B = 0.50 \times 10^{-4}$ T. ماذا سيكون مقدار سرعة إلكترون واتّجاهه حتى تتوازن القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة فيه مع وزنه

.72 ذرة هيليوم لها شحنة ثنائية (He^{+2})، وكتلتها 6.6×10^{-27} kg. تتسارع بواسطة فرق جهد مقداره 2400 V. (أ) ماذا سيكون نصف قطر مسارها في مجال مغناطيسيّ منتظم شدته 0.240-T؟ (ب) ما الزمن الدوري لحركتها؟

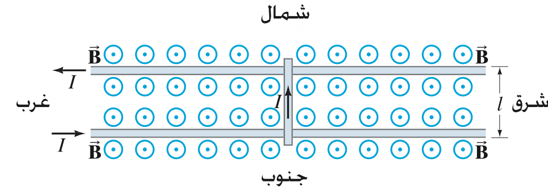
.73 مبدأ عمل جهاز إطلاق المقذوفات موضح في الشّكل 20- 65. يمر تيار عالٍ في حلقة تتكون من سكتين، وبطارية، وقضيب خفيف عديم الاحتكاك يلمس كلتا السكتين. المجال المغناطيسيّ عمودي على مستوى الحلقة. إذا كان طول القضيب $L = 22$ cm، وكتلته 1.5g ويستقر في مجال مغناطيسيّ شدته 1.7 T، فما التّيّار الذي يجب مروره حتى يتسارع القضيب من السكون لسرعة 28 m/s في مسافة مقدارها 1 m؟ بأيّ اتّجاه يجب أن يكون المجال المغناطيسيّ؟



الشكل **20–65**
مسألة 73

.74 في الشّكل 20 - 60، إذا كان السلكُ العلويُّ مصنوعًا من النحاس وقطره 1.00-mm ومعلّقًا في الهواء بسبب القوّتين المغناطيسيّتين من السلكين السفليين، إذا مرّ تيّارٌ مقداره 95 A في كلا السلكين السفليين، فاحسب التّيّار اللازم مروره في السلك العلويّ المعلّق؟

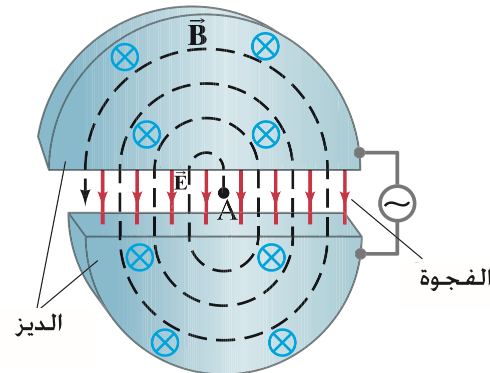
.75 سلكان قويّان متوازيان، المسافة بينهما l في مستوًى أفقيٍّ يعملان كسكّةٍ لقضيبٍ فلزّيّ خفيف كتلته m عموديّ على كلّ منهما (الشّكل 20 - 66). إذا أثّر مجال مغناطيسيّ عموديًّا للخارج. وعند $t = 0$، وصل السلكان بمصدر كهربائيّ بحيث يمرّ تيار مقداره I في المجموعة، فاحسب سرعة القضيب الذي يبدأ الحركة من السكون كدالة في الزمن: (أ) على فرض عدم وجود احتكاك بين القضيب والسلكين. (ب) إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بينهما μ_k. (ج) إذا كان التّيّار المار فيه باتّجاه الشّمال، فهل يتحرّك القضيب نحو الشرق أم نحو الغرب؟



الشكل 20 – 66 قضيب ينزلق على سكتين، مسألة 75.

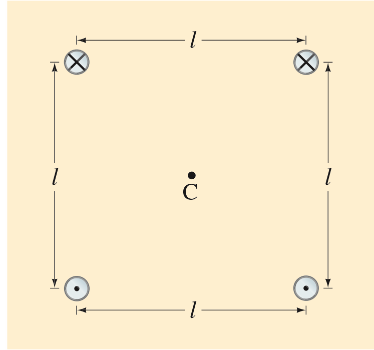
.76 احسب أقصى انحراف لحزمة الإلكترونات بالقرب من مركز شاشة التلفاز نتيجة المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته 5.0×10^{-5} T. افرض أنّ شاشة CRT (البند 17 – 10) تبعد 22 cm عن مصدر الإلكترونات بحيث تتسارع هذه الإلكترونات بفرق جهد مقداره (أ) 2.0 kV. (ب) 30 kV.

.77 السيكلوترون (الشّكل 20 – 67) جهازٌ يُستخدم لمُسارعة الجُسيمات المشحونة مثل البروتونات. تبدأ الجُسيمات عند النقطة A بسرعة ابتدائية، ثمّ تتحرّك بمساراتٍ دائريّةٍ في المجال المغناطيسيّ B. وكلّما عبرت الجُسيمات الفجوة بين "الديز" تتعرّض لمجالٍ كهربائيٍّ يعمل على تسريعها وزيادة طاقتها الحركية (لا يوجد مجال كهربائي في فجوات "الديز"). المجال الكهربائيّ يغيّر اتّجاهه كلّ نصف دورة بسبب فرق الجهد المتغيّر $V = V_0 \sin 2\pi f t$ وبالتالي تزداد سرعة الجسيمات عند كلّ مرور خلال الفجوة. (أ) اثبت أنّ تردّد الفولتيّة f يجب أن يكون $f = Bq/2\pi m$؛ حيث q هي شحنةُ الجُسيمات، وm كتلتها. (ب) اثبت أنّ الطاقة الحركية للجسيمات تزداد بمعدل $2qV_0$ خلال كلّ دورة على اعتبار أنّ الفجوة صغيرة جدًّا. (ج) إذا كان نصف قطر السيكلوترون 2.0 m وشدة المجال المغناطيسيّ 0.50 T، فماذا ستكون أقصى طاقةٍ حركيّةٍ للبروتونات المتسارعة بوحدة MeV؟



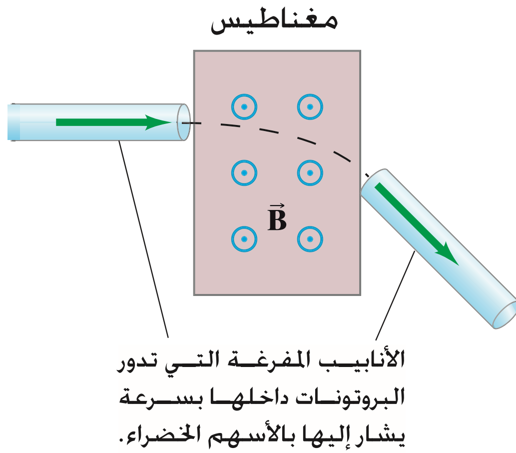
الشكل 20 – 67 السيكلوترون مسألة 77

.78 أربعةُ أسلاكٍ طويلةٍ مستقيمةٍ ومتوازيةٍ، موضوعةً عند رؤوس مربّع طول ضلعه l، تحمل تيارات متساوية I_0، عموديّة على الورقة كما هو موضح في (الشّكل 20 - 68). احسب مقدار المجال المغناطيسيّ واتّجاهه عند مركز المربع (C).



الشكل 20 – 68 مسألة 78

.79 المجال المغناطيسيّ مفيدٌ جدًّا في مُسارعات الجُسيمات لتوجيه حزمة الجُسيمات، أي تغيير اتّجاهها دون تغيير سرعتها (الشّكل 20 – 69). بيّن كيف يحدث ذلك لحزمة من البروتونات. ماذا يحدث للبروتونات التي لا تتحرك بالسرعة التي صمّم المجال المغناطيسيّ لأجلها؟ إذا كان المجال المغناطيسيّ يؤثر في منطقة عمقها 5.0 cm وقيمته 0.33 T، فما الزاوية التي ستنحرفها حزمة من البروتونات تتحرك بسرعة 1.0×10^{7} m/s.



الشكل 20 – 69 مسألة 79

.80 المجالُ المغناطيسيُّ في مركز ملفٍّ دائريٍّ، يحمل تيّارًا مقداره I (كما في الشّكل 20 – 9) هو

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2r}$$

حيث N عدد اللفّات، و r نصف قطره. افرض أنّ المغناطيس الكهربائيّ يستخدم ملفًا قطره 1.2 m ومصنوع من سلك نحاسيّ مربع طول ضلعه 1.6 mm. إذا كانت البطارية تعطي 120 V وأقصى قدرة تساوي 4.0 kW: (أ) كم عدد اللفات التي نحتاج إليها لتشغيل البطارية بالقدرة القصوى؟ (ب) ما شدة المجال المغناطيسيّ في مركز الملفّ؟ (ج) إذا استخدمت أكبر عدد من اللفّات والبطاريّة نفسها (بحيث يبقى جهدها 120 V)، فهل تحصل على مجال مغناطيسيّ أكبر؟ وضّح إجابتك.

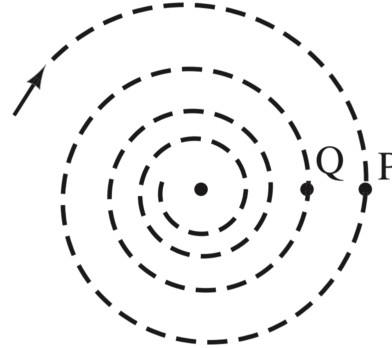
81. قيمةُ المجال المغناطيسيّ بالقرب من قطبيّ الأرض هي $(1 \times 10^{-4}\,T)$ 1 G تقريبًا. تخيّلْ نموذجًا بسيطًا يكون فيه المجال الأرضي ناتجًا من حلقة تحمل تيارًا حول خطّ الاستواء. احسب التّيّار الذي يمرّ في هذه الحلقة.

[مفتاح الحلّ: استخدم العلاقة المعطاة في التمرين 80]

82. إذا أردت أن تأخذ فكرة عن المجال المغناطيسيّ الذي يتولّد من خطّين من خطوط الضغط العالي. وإذا قدّرت أنّ ارتفاع كلٍّ منهما نحو 30 m عن سطح الأرض ويبعدان مسافة 3 m عن بعضهما. وإذا أخبرك مسؤول في شركة الكهرباء أنّ هذه الخطوط تعمل على 10 kV، وبقدرة قصوى مقدارها 40 MW للمنطقة المحلّية، فاحسب أقصى مجال مغناطيسيّ يؤثّر فيك عندما تسير تحت هذه الخطوط، وقارنه بالمجال المغناطيسيّ الأرضي.

83. (أ) ما قيمة المجال المغناطيسيّ اللازم لجعل حزمة من الإلكترونات تتحرك إلى اليمين بسرعة 4.8×10^{6} m/s، وتسير دون انحراف في حيّز يحوي مجالا كهربائيًّا مقداره 10,000 V/m باتجاه عمودي للأعلى؟
(ب) ما اتجاه المجال المغناطيسيّ إذا كان عموديًّا على المجال الكهربائيّ؟
(ج) ما تردد المسار الدائريّ للإلكترونات إذا أقفل المجال الكهربائيّ؟

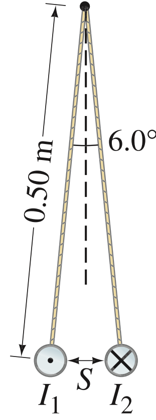
84. يتحرك بروتون في مسار لولبي في غاز تحت تأثير مجال مغناطيسيّ شدته 0.010 T عموديًّا على المسار الحلزونيّ كما في (الشّكل 20 – 70). في دورتين متتاليتين يكون نصف القطر عند النقطتين P و Q، نصف القطرين هما 10.0 mm، و 8.5 mm على الترتيب. احسب التغير في الطاقة الحركية للبروتون عندما ينتقل من النقطة P إلى النقطة Q.



الشكل **20 - 70**
مسألة 84

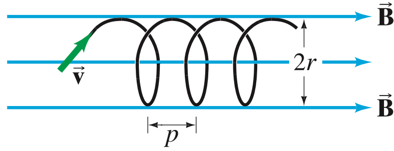
85. ملفٌّ حلزونيٌّ طولُهُ 32-cm، وقطره 1.8 cm ينتج مجالاً مغناطيسيًا مقداره 0.30-T في مركزه. إذا كان أقصى تيّارٍ يساوي 5.7 A، فكم عدد اللفات التي يجب أن يحتويها الملف؟

86. سلكان طويلان من الألمنيوم، قطر كلّ منهما 0.50 mm، ويحملان التّيّار نفسه ولكن باتجاهين متعاكسين، عُلّقا بخيطين طول كلّ منهما 0.50 m كما في الشّكل 20 – 71. إذا صنع خيطا التعليق زاوية °3.0 مع العمودي، فما هو التّيّار المار في السلكين.



الشكل 20 – 71 مسألة 86

87. يدخل إلكترون مجالاً مغناطيسيًّا منتظمًا شدته $B = 0.23$ T بزاوية °45 مع $\vec{B}$. احسب نصف القطر r والمسافة p بين الحلقات للمسار الحلزونيّ للإلكترون على افتراض أنّ سرعته تساوي 3.0×10^{6} m/s (انظر الشّكل 20 – 72)



الشكل 20 – 72 مسألة 87

إجابات التمارين

أ: بالقرب من الأقطاب حيث تكون خطوط المجال قريبة من بعضها.
ب: عكس اتجاه عقارب الساعة.
جـ: 0.15N
د: صفر
هـ: سالب، اتجاه المسار الحلزونيّ سينعكس
و: 2.0 cm



يُعدّ قانون فارادي في الحثّ أحد القوانين العظيمة في الفيزياء وينصّ على أنّ التغير في التدفق ينتج قوة دافعة تأثيرية. ترينا هذه الصورة قضيبًا مغناطيسيًا يتحرك داخل ملف، فيسجل الجلفانوميتر تيارًا تأثيريًّا. إنّ هذه الظاهرة في الحثّ الكهرومغناطيسي هي أساس عمل عدد كبير من الأجهزة العملية كالمولدات، والمحوّلات، وذاكرة الحاسوب وغيرها.

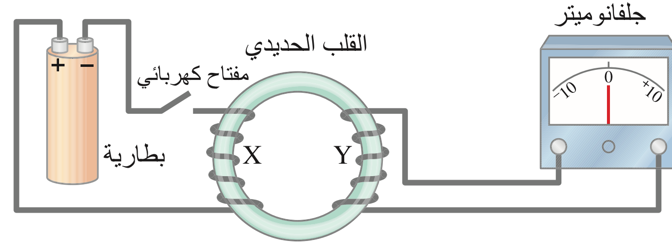
الفصل 21

الحثّ الكهرومغناطيسيّ وقانون فارادي

في (الفصل 20)، ناقشنا طريقتين ترتبط من خلالهما الكهرباء بالمغناطيسيّة هما: 1- التيّار الكهربائيُّ ينتج مجالاً مغناطيسيًّا. 2- المجالُ المغناطيسيُّ يؤثّر بقوّةٍ في التيّار الكهربائيِّ والشحناتِ المتحركة. وعندما اكتشفت هذه الظواهر في 1820-1821، بدأ العلماء يتساءلون: إذا كان التيار الكهربائي ينتج مجالا مغناطيسيًّا، فهل من الممكن للمجال المغناطيسي أن ينتج تيارًا كهربائيًّا؟ بعد عشر سنوات من ذلك التاريخ، وجد الأمريكي جوزيف هنري (1797-1878) والإنجليزي ميشيل فارادي (1791-1867)، كلٌّ منهما على حدة أنّ ذلك ممكنًا. استطاع هنري اكتشاف ذلك أولًا، ولكن فارادي نشر نتائجه بشكل أكثر تفصيلًا قبل هنري. سنناقش في هذا الفصل هذه الظاهرة، وبعض تطبيقاتها، التي غيرت العالم، كالمولدات الكهربائية.

1-21 القوة الدافعة التأثيرية

في محاولته لإنتاج تيار كهربائي من المجال المغناطيسي، استخدم فارادي أدوات كتلك الموضحة في (الشكل 21-1). الملف X موصول ببطارية. التيار الذي يمر في الملف X ينتج مجالا مغناطيسيًّا يزداد عن طريق القلب الحديدي الذي لفّ عليه الملفّ. كان فارادي يأمل أنّ التيار المستمر القوي في الملف X سينتج مجالاً مغناطيسيًّا قويًّا يكفي لإنتاج تيار في الملف الثاني Y الذي يشترك بالقلب الحديدي نفسه. تحتوي الدارة الثانية Y على جلفانوميتر للكشف عن أيّ تيار، ولكنّها لا تحوي أيّ بطارية.



الشكل 1-21 تجربة فارادي لإنتاج قوة دافعة تأثيرية

لم ينجح فارادي باستخدام تيّارٍ ثابت. ولكنّه لاحظ في النهاية أنّ الجلفانوميتر في الدارة Y ينحرف بقوة عند لحظة إغلاق المفتاح في الدارة X. ينتج التيار الثابت في X مجالاً مغناطيسيًّا ثابتًا، ولا ينتج أيّ تيار في الدارة Y، إلا عندما يبدأ التيار في الدارة X أو يتوقف، عندها ينتج تيارًا في هذه الدارة.

استنتج فارادي بأنّه مع أنّ المجال المغناطيسي الثابت لا ينتج تيارًا في الموصل، إلّا أنّ التغيّر في المجال المغناطيسي يستطيع إنتاج تيار كهربائيّ. سُمِّي التّيّارَ التّأثيريّ. عندما يتغير المجال المغناطيسي خلال الملف Y، فإنّ تيارًا يظهر في Y حتى دون وجود بطارية أو أيّ مصدر للتيار فيها. لذا، نستطيع القول إنّ:

"التّغير في المجال المغناطيسي ينتج قوة دافعة تأثيرية"

أجرى فارادي تجارب أخرى في **الحثّ الكهرومغناطيسي** (كما سميت هذه الظاهرة). على سبيل المثال (الشكل 2-21) يرينا أنّ المغناطيس إذا تحرك بسرعة في ملف، فإنّ تيارًا تأثيريًّا ينتج في الأسلاك. وإذا أزيل المغناطيس بقوة (خارج الملف)، فإنّ تيارًا تأثيريًّا ينتج بالاتجاه المعاكس (يقلّ $\vec{\mathbf{B}}$ خلال الملف). بالإضافة إلى ذلك، لو بقي المغناطيس ساكنًا وحُرِّك الملفّ مبتعدًا أو مقتربًا من المغناطيس، فإنّه سينتج مرّةً أخرى قوّة دافعة تأثيرية، ومن ثمّ تيارًا تأثيريًّا في الملف. إنّ التحريك والتغير يؤديان إلى إنتاج قوة دافعة تأثيرية، ولا يهم أيّ من الملف أو المغناطيس سيتحرك، بل إنّ المهم هنا هو الحركة النسبية بينهما.

تنويه:

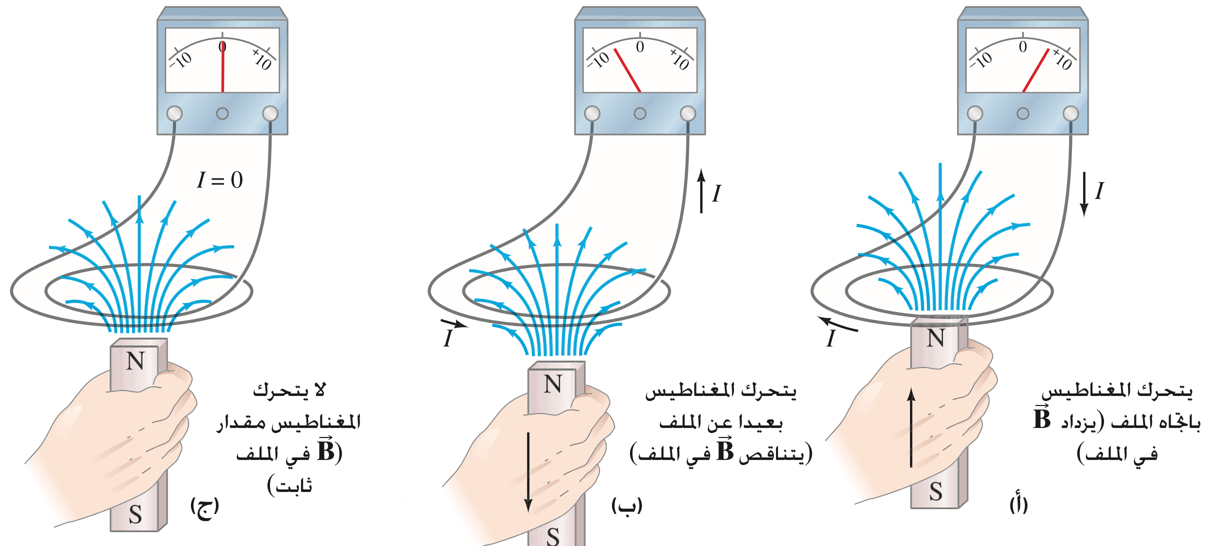
التغيّر في $\vec{\mathbf{B}}$ وليس $\vec{\mathbf{B}}$ نفسه هو الذي ينتج تيارًا تأثيريًّا.

التغير في $\vec{\mathbf{B}}$ ينتج emf

الشكل 2-21 (أ) ينتج تيار تأثيري عندما يتحرك المغناطيس باتجاه الملف، لحظيًّا يزداد المجال المغناطيسي في الملف. (ب) يكون التيار التأثيريّ بالاتجاه المعاكس عندما يتحرك المغناطيس بعيدًا عن الملف (B يتناقص). لاحظ أنّ صفر الجلفانوميتر يقع في منتصف التدريج، وينحرف المؤشر نحو اليمين أو اليسار اعتمادًا على اتجاه التيار. وفي (جـ) لا ينتج أيّ تيار تأثيريّ إذا لم يتحرك المغناطيس بالنسبة إلى الملف. الحركة النسبية هي التي تعتمد هنا. فمن الممكن أن يبقى المغناطيس ساكنًا، في حين يتحرك الملف. وفي هذه الحالة أيضًا تنتج قوة دافعة تأثيرية.

تنويه:

الحركة النسبية للمغناطيس أو الملف تنتج تيارًا تأثيريًّا.



2-21 قانون فارادي في الحثّ وقانون لنز

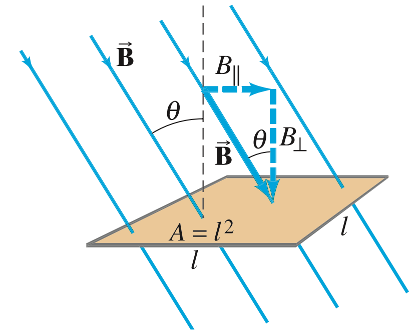
حقَّقَ فارادي كميًّا من العوامل التي تؤثّر في مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة التأثيريّة. ووجد أولًا أنّه كلّما ازداد التغيّر في المجال المغناطيسي زادت القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف. ولكن القوة الدافعة التأثيرية لا تتناسب ببساطة مع معدّل التغيّر في المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$. ولكنّها تعتمد أيضًا على كلٍّ من مساحة الملفّ والزاوية؛ أي أنّ القوة الدافعة التأثيرية تتناسب مع معدّل تغيّر التدفق المغناطيسي Φ_B خلال الملف. التدفق المغناطيسي الناتج من مجال مغناطيسي منتظم خلال عروة مساحتها A يعطى حسب العلاقة الآتية:

$$\Phi_B = B_{\perp} A = BA\cos\theta \qquad [B \text{ uniform}] \qquad \textbf{(1-21)}$$

هنا، $B_{\perp}$ هي مركبة المجال المغناطيسيّ العموديّةِ على سطح العروة. أمّا θ فهي الزاوية بين $\vec{\mathbf{B}}$ والعموديّ على سطح العروة. هذه الكميّات موضحة في (الشكل 21-3) لعروة مربعة طول ضلعها l ومساحتها $A = l^2$. عندما يكون سطح العروة موازيًا لـ $\vec{\mathbf{B}}$، فإنّ $\theta = 90°$. وعليه، فإنّ $\Phi_B = 0$. وعندما يكون $\vec{\mathbf{B}}$ عموديًّا على العروة، فإنّ $\theta = 0°$. لذا يكون:

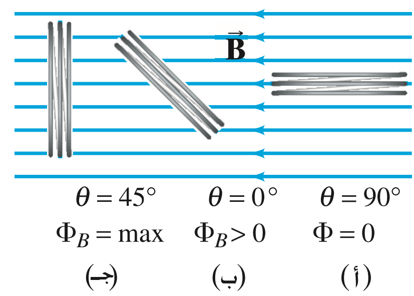
$$\Phi_B = BA \qquad [\vec{\mathbf{B}} \text{ منتظم وعموديّ على سطح العروة}]$$

كما رأينا في (الفصل 20)، فإنّ خطوط المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ (مثل خطوط المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$) نستطيع رسمها بحيث يكون عدد الخطوط في وحدة المساحة يتناسب مع شدة المجال. ولهذا، فإنّ التدفق Φ_B يتناسب مع العدد الكلي للخطوط التي تخترق المساحة التي تشكلها العروة. وهذا موضّحٌ في (الشكل 21 - 4) حيث نشاهد مقطعًا جانبيًّا للعروة. عند $\theta = 90°$ فإنه لا يمرّ أيّ من خطوط المجال خلال العروة. ومن هنا، يكون $\Phi_B = 0$. أما Φ_B فتعطينا قيمة قصوى عندما تكون $\theta = 0°$. وحدة التدفق المغناطيسيّ هي تسلا. م^2 (tesla.m^2) وهذه تُسَمّى بالويبر (weber) حيث $1\ \text{Wb} = 1\ \text{T}\cdot\text{m}^2$.



الشكل 21-3 إيجاد التدفق خلال عروة مربعة مساحتها $A = l^2$ وطول ضلعها 1 ومساحتها $A = l^2$

الشكل 21-4 يتناسب التدفق المغناطيسي مع عدد خطوط المجال $\vec{\mathbf{B}}$ التي تمر خلال العروة.

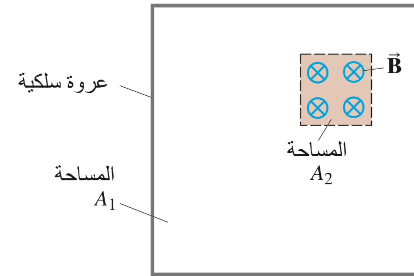


المثال المفاهيمي 21-1 إيجاد التدفق

عروةٌ مربّعةٌ، مساحتها A_1 كما هو موضَّح في (الشكل 21-5). إذا أثّر مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظم عمودي فيها خلال مساحة مقدارها A_2، فما هو التدفق المغناطيسي خلال العروة A_1؟

الإجابة: نفترض أنّ المجال المغناطيسي خارج المساحة A_2 يساوي صفرًا. التدفق الكلي خلال A_1 يساوي التدفق خلال A_2، ويكون من (المعادلة 21-1) مساويًا لـ BA_2 بالإضافة للتدفق خلال المساحة المتبقية ($= A_1 - A_2$) الذي يساوي صفرًا؛ لأنّ $B = 0$. إذن، التدفق الكلي يساوي $\Phi_B = BA_2 + 0(A_1 - A_2) = BA_2$ ولا يساوي BA_1؛ لأنّ $\vec{\mathbf{B}}$ ليس منتظمًا خلال A_1.

الشكل 21-5 (المثال 21-1)



المثال 21-3 حساب التدفق

عروةٌ سلكيّةٌ مربّعةٌ، طول ضلعها 10.0 cm، موضوعة في مجال مغناطيسي شدته 1.25-T. ما أقصى وأقلّ قيمة للتدفق خلال هذه العروة؟

النّهج: يُعطى التدفق (بالعلاقة 21-1)، وتكون له قيمة قصوى عند $\theta = 0°$، وتظهر عندما يكون مستوى العروة عموديًّا على المجال $\vec{\mathbf{B}}$، أما أقلّ قيمة للتدفق فتكون عند $\theta = 90°$، وتظهر عندما يكون مستوى العروة موازيًا للمجال $\vec{\mathbf{B}}$.

الحلّ: من (المعادلة 21-1)، القيمة القصوى للتدفق تساوي

$$\Phi_B = BA\cos\theta = (1.25\ \text{T})(0.100\ \text{m})(0.100\ \text{m})\cos 0° = 0.0125\ \text{Wb}$$

أقلّ قيمة للتدفق تساوي صفرًا عندما $\theta = 90°$ و $\cos 90° = 0$.

تمرين A : أوجد التدفق في (المثال 21-2) عندما يصنع العمودي على العروة زاوية مقدارها 35^o مع $\vec{\mathbf{B}}$.

من خلال تعريف التدفق في (المعادلة 21-1)، نستطيع الآن كتابة نتائج أبحاث فارادي. إذا تغير التدفق خلال عروة سلكية بالمقدار $\Delta\Phi_B$ خلال فترة زمنية قصيرة Δt، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة من هذه اللحظة تعطى بالعلاقة

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}. \qquad [\text{عروة واحدة}] \qquad \textbf{(2-21أ)}$$

قانون فارادي في الحث

وهذه النتيجة الأساسية تُسَمّى **قانون فارادي في الحثّ** وهو أحد القوانين الأساسية في الكهرومغناطيسية

قانون فارادي في الحثّ

قانون لنز

إذا كانت الدارة تتكون من عدد من العُرى مقداره N، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية لكلِّ عروةٍ تضاف إلى بعضها بعضا لتكون

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}. \qquad [N \text{ عروة}] \qquad (\text{2-21ب})$$

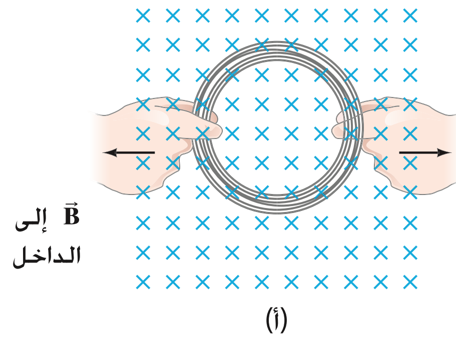
تذكّرنا الإشارة السالبة في (المعادلات 21-2) باتجاه القوة الدافعة التأثيرية المتولدة. وقد بيّنت التجارب أنّ:
التيار الناتج من القوّة الدافعة التأثيريّة يتحرّك بحيث يكون مجاله المغناطيسي معاكسًا للتغيّر الأصليّ في التدفّق.

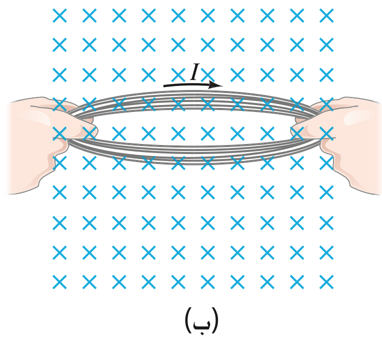
هذا القانون يُعرف بقانون لنز. لاحظ أننا نناقش الآن مجالين مغناطيسيين مختلفين هما: 1 - المجال المغناطيسي المتغيّر أو التدفق الذي ينتج تيارًا تأثيريًّا. 2 - المجال المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري (التيارات كلها تنتج مجالات مغناطيسية). ويكون المجال الثاني معاكسًا للتغير في المجال الأول.

دعنا الآن نطبق قانون لنز على الحركة النسبية بين المغناطيس والملف في (الشكل 21 - 2). ينتج التغيرُ في التدفّق خلال الملفّ قوّةً دافعة تأثيريّة في الملفّ نفسه ممّا يؤدّي إلى إنتاج تيّارٍ تأثيري. وهذا التيّار التأثيريّ ينتج مجاله المغناطيسي الخاص به. في (الشكل 21 - 2أ)، المسافة بين الملف والمغناطيس تقلّ. لذا، فإنّ المجال المغناطيسي للمغناطيس (وعدد خطوط المجال) خلال الملف يزداد. ومن ثمّ يزداد التدفق. يشير اتجاه المجال المغناطيسي إلى الأعلى. ولمعاكسة الزيادة نحو الأعلى؛ فإنّ المجال المغناطيسي داخل الملف الناتج من التيار التأثيري يجب أن يكون نحو الأسفل. وعليه، فإنّ قانون لنز يشير إلى أنّ التيار يتحرك كما هو مبيّن بالشكل (باستخدام قاعدة اليد اليمنى). في (الشكل 21-2ب). يقل التدفق (لأنّ المغناطيس يتحرك بعيدًا فيقل B) بحيث إنّ التيّارَ التأثيريَّ في الملفِّ ينتج مجالًا مغناطيسيًّا نحو الأعلى خلال الملفّ لتعديل الوضع السائد. ومن هنا، فإنّ التيار في (الشكل21-2ب) بالاتجاه المعاكس لما هو عليه في (الشكل 21-2أ).

من المهمّ ملاحظة أنّ القوّة الدافعة التأثيرية تتولد عندما يكون هنالك تغيّر في التدفّق خلال الملفّ. وهنا سنأخذ بالحسبان حالات أخرى.

تنويه:
ميّز بين مجالين مغناطيسيين مختلفين.



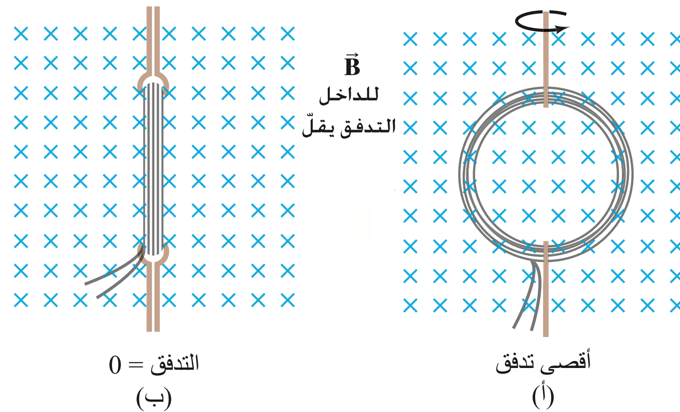


(ب) (أ)

الشكل 21-6 التيار التأثيري ينتج من تغير مساحة الملف حتى لو لم يتغير B. في (الشكل 21-7)، يقلّ التدفق خلال الملف عندما نذهب من (a) إلى (b). هنا، يؤثر التيار البسيط الناتج بالاتجاه الموضح بحيث يحاول معادلة التدفق الأصلي ($\Phi = BA$) بإنتاج مجاله المغناطيسي الخاص به داخل الورقة؛ أي أنه كلما قلت A، فإنّ التيار يؤثر بحيث يزيد B بالاتجاه الأصلي (إلى الداخل).

ثلاث طرق لتغيير التدفق: تغيير B أو A، أو θ

حيث إنّ التدفّق المغناطيسي يساوي $\Phi_B = BA\cos\theta$، فإنّنا نرى أنّ القوّة الدافعة التأثيريّة يمكن تولدها بثلاث طرق هي: 1 - تغيير المجال المغناطيسي B. 2 - تغيير مساحة العروة A في منطقة المجال. 3 - تغيير الزاوية بالنسبة إلى المجال. (الشكلان 21 - 1 و 21 - 2) يلخصان الحالة الأولى. وهناك أمثلة على الحالتين الثانية و الثالثة موضحة في الشكلين 21-6 و 21-7 على الترتيب.



الشكل 21 - 7 نستطيع توليد التيار التأثيري بإدارة الملف في المجال المغناطيسي. يتغير التدفق في الملف من (a) إلى (b) لأنّ θ في المعادلة (21-1) تتغير من $90°\ (\cos\theta = 0)$ إلى $0°\ (\cos\theta = 1)$



الشكل 21-8 (المثال 21-3): موقد التدفق

المثال المفاهيمي 21-3 موقد التدفّق

في موقد التدفّق الموضّح في (الشكل 21-8). يمرُّ تيّارٌ متناوب ac حول الملف في الحارقة (الحارقة لا تسخن). لماذا يُسَخَّن المقلاة الفلزيّة ولا يُسَخَّن الوعاءَ الزجاجيَّ؟

الإجابة: لأنّ التيّار المتردّد يعمل تغييرًا في المجال المغناطيسي الذي يمرُّ في قاعدة المقلاة. وهذا يؤدّي إلى إنتاج تيار تأثيري في القاعدة. وبما أنّ المقلاة تحتوي مقاومة. فإنّ الطاقة الكهربائية تتحوّل إلى طاقةٍ حراريّةٍ تؤدّي إلى تسخين القدر ومحتوياته. ولأنّ مقاومة الوعاء الزجاجيّ عاليةٌ جدًّا. فإنّ التيار التأثيري المتولّد فيه قليلٌ جدًّا. ولهذا. فإنّ طاقةً قليلةً تتحوّل فيه إلى حرارة $(P = V^2/R)$.

طريقة حلّ الأسئلة — قانون لنز

يُستخدم قانون لنز لتحديد الاتجاه المفترض للتيار التأثيري المتولّد في عروة بسبب التغير في التدفق خلال العروة. لإنتاج تيار تأثيري؛ ستحتاج إلى ما يلي:

(أ) عروة موصلة مغلقة.

(ب) تدفق مغناطيس خارجي خلال العروة يتغير مع الزمن.

1. حدّد ما إذا كان التدفق المغناطيسي $(\Phi = BA\cos\theta)$ خلال العروة يقلّ، أم يزداد، أم يبقى ثابتًا.

2. المجال المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري:

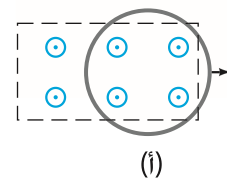
(أ) يشير إلى اتجاه المجال الخارجي نفسه إذا تناقص التدفق.

(ب) يشير إلى الاتجاه المعاكس للمجال الخارجي إذا ازداد التدفق.

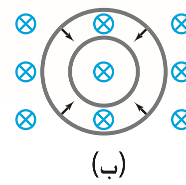
(جـ) يساوي صفرًا إن لم يتغيّر التدفق.

3. عندما تحدد اتجاه المجال المغناطيسي التأثيري، فإنّك تستطيع إيجاد اتجاه التيار التأثيري باستخدام قاعدة اليد اليمنى 1- (ص 562).

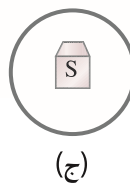
4. تذكّر دائمًا أنّ لدينا مجالين مغناطيسيين هما: 1 - مجال مغناطيسي خارجي يتغير تدفقه فيولد تيارًا تأثيريًّا. 2 - مجال مغناطيسي ينتج من التيار التأثيري.



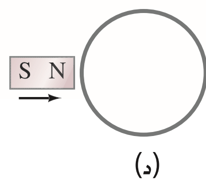
(أ) دفع العروة نحو اليمين خارج المجال المغناطيسي الذي يشير إلى داخل الصفحة.



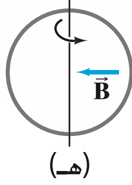
(ب) تقليص عروة في مجال مغناطيسي إلى خارج الصفحة.



(ج) قطب مغناطيسي شمالي يتحرك باتجاه العروة (عمودي على الصفحة)



(د) قطب مغناطيسي شمالي يتحرك باتجاه العروة (موازٍ للصفحة)



(هـ) إدارة العروة بدفع الجهة اليسرى باتجاهنا واليمنى نحو الداخل. يشير المجال المغناطيسي من اليمين إلى اليسار.

الشكل 21-9 (المثال 21-4)

المثال المفاهيمي 21-4 التعامل مع قانون لنز عمليًا

ما اتجاهُ التيّار التأثيري المتولّد في كلّ حالة من الحالات الموضّحة في (الشكل 21 - 9)؟

الإجابة: (أ) بدايةً. يشير المجال المغناطيسي إلى خارج الصفحة بحيث يمرُّ في العروة. إذا سحبت العروة خارج المجال. فإنّ التدفق المغناطيسي خلالها سيتناقص أي أنّ التيار التأثيري الناتج يجب أن يكون بالاتجاه الذي يعوّض تناقص التدفق خلال العروة. وبذلك يكون التيار عكس اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي للخارج (باتجاه القارئ).

(ب) يشير المجال المغناطيسي إلى داخل الصفحة. تقلّ مساحة الملف فيقلّ التدفق. وهنا. فإنّ التيار التأثيري المتولد يجب أن يكون مع اتجاه عقارب الساعة. بحيث ينتج مجالا مغناطيسيًّا داخل الصفحة لجعل التدفق يتناقص.

(جـ) تشير خطوط المجال المغناطيسي مبتعدة عن القطب الشمالي للمغناطيس. ولأنّ المغناطيس يتحرك باتجاه العروة. فإنّ المجال المغناطيسي يكون داخلا في الصفحة ويزداد مع تقريب المغناطيس. يجب أن يكون التيار في العروة عكس اتجاه عقارب الساعة لتوليد مجال مغناطيسي $\vec{B}$ خارج الصفحة.

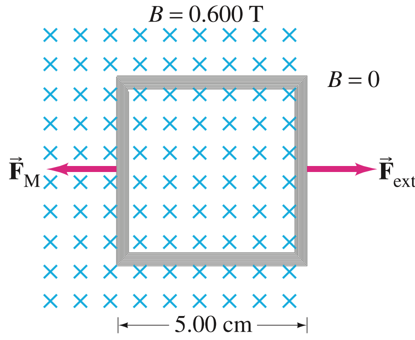
(د) المجال المغناطيسي في مستوى العروة نفسه؛ أي. لا توجد خطوط مجال مغناطيسي تخترق العروة. ويساوي التدفق خلال العروة صفرا خلال العملية. ولا يكون هنالك أيّ تغيير في التدفق المغناطيسي الخارجي مع الزمن. وهنا. لا تتولد قوة دافعة تأثيرية. ولا تيار تأثيري في العروة.

(هـ) في البداية. لا يكون هنالك أيُّ تدفّقٍ خلال العروة. وعندما نبدأ بإدارة العروة. يبدأ المجال الخارجي بالازدياد خلال العروة لليسار. ولتعويض هذا التغيّر في التدفّق؛ يتكون تيّار عكس اتجاه عقارب الساعة في العروة لإنتاج مجال مغناطيسي خاص به لليمين.

تنويه: يعاكس المجالُ المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري يعاكس التّغيُّر في التدفق الخارجي، وليس شرطا أن يكون معاكسًا للمجال الخارجي.

المثال 5-21 دفع ملفّ بعيدًا عن مجال مغناطيسي

ملفٌّ مربّعٌ مصنوعٌ من سلكٍ موصّلٍ طول ضلعه $l = 5.00\text{ cm}$ ويحوي 100 لفّةٍ موضوعٌ عموديًّا على مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.600-T كما هو موضح في (الشكل 21 - 10). إذا سحب الملف بسرعة (بحيث يتحرك عموديًّا على $\vec{\mathbf{B}}$) إلى المنطقة التي يصبح فيها B مساويًا للصفر. عند $t = 0$، فستكون الحافة اليمنى للملفّ على حافّة المجال. وعندما يتحرّك الملفّ، فإنّه يحتاج إلى زمن مقداره 0.100 s حتى يصبح بأكمله خارج منطقة المجال. إذا كانت المقاومة الكلية للملف 100 Ω فاحسب ما يلي (أ) معدّل تغيّر التدفق مع الزمن خلال الملف. (ب) القوّة الدافعة التأثيرية والتيار التأثيري في الملف. (جـ) الطاقة المستنفدة خلال الملف. (د) متوسط القوة اللازمة لتحريك الملف.



الشكل 21-10 المثال 21-5 يدفع الملف المربع الموجود في مجال مغناطيسي شدته $B = 0.600\text{ T}$ بعيدًا نحو اليمين إلى المنطقة التي يكون فيها $B = 0$

النّهج: نبدأ بإيجاد كيفيّة تغيُّر التدفّق المغناطيسي $\Phi_B = BA$ خلال الفترة الزمنيّة $\Delta t = 0.100\text{ s}$. يعطينا قانون فارادي بعد ذلك القوّة الدافعة التأثيرية المتولّدة. أمّا قانون أوم فيعطينا التيار التأثيري المتولّد.

الحلّ: (أ) مساحة الملفّ تساوي

$$A = l^2 = (5.00 \times 10^{-2}\text{ m})^2 = 2.50 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$ والتدفق في البداية يساوي

$$\Phi_B = BA = (0.600\text{ T})(2.50 \times 10^{-3}\text{ m}^2) = 1.50 \times 10^{-3}\text{ Wb}$$

معدّل تغيّر التدفّق ثابت (لأنّ الملف مربع الشكل) ويساوي

$$\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{0 - (1.50 \times 10^{-3}\text{ Wb})}{0.100\text{ s}} = -1.50 \times 10^{-2}\text{ Wb/s}$$

(ب)القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة (المعادلة 21-2) في 100 لفة خلال الفترة 0.100-s تساوي

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -(100)(-1.50 \times 10^{-2}\text{ Wb/s}) = 1.50 \times 10^{-2}\text{ A} = 1.50\text{ V}$$

ويمكن إيجاد التيار التأثيري المتولّد بتطبيق قانون أوم على الملفّ الذي مقاومته 100-Ω.

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{1.50\text{ V}}{100\ \Omega} = 15.0\text{ mA}$$

من قانون لنز يجب أن يكون التيار مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ يزداد باتجاه الصفحة. ويعاكس النقصان في التدفق المغناطيسي باتجاه الصفحة.

(جـ) الطاقة الكليّة المستنفدة في الملف هي حاصل ضرب القدرة $(= I^2R)$ في الزمن

$$E = Pt = I^2Rt = (1.50 \times 10^{-2}\text{ A})^2(100\ \Omega)(0.100\text{ s}) = 2.25 \times 10^{-3}\text{ J}$$

(د) نستطيع استخدام النتيجة في الفرع (جـ) وتطبيق نظرية الشغل والطاقة: الطاقة المستنفدة E تساوي الشغل W الناتج لسحب الملف خارج المجال (الفصل 6). ولأنّ $W = \bar{F}d$، حيث d =5.00 cm وتكون

$$\bar{F} = \frac{W}{d} = \frac{2.25 \times 10^{-3}\text{ J}}{5.00 \times 10^{-2}\text{ m}} = 0.0450\text{ N}$$

حلّ آخر للفرع (د): نستطيع أيضًا حساب القوة مباشرة من القانون $F = IlB$ (المعادلة 20-2) للمجال المغناطيسي الثابت $\vec{\mathbf{B}}$. القوتان المؤثرتان في الجزأين العلوي والسفلي متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه. لذا، يلغيان بعضهما بعضا. القوة المؤثرة في الضلع الأيسر للملف تؤثر إلى اليسار كما هو موضح؛ لأنّ التيار يكون إلى الأعلى (مع اتجاه عقارب الساعة). أمّا الضلع الأيمن للعروة فلا يتأثر بأيّ قوة؛ لأنّ $\vec{\mathbf{B}}=0$. وهنا، تلغي القوةُ الخارجيةُ إلى اليمين القوةَ إلى اليسار وتساوي $F_{ext} = NIlB = (100)(0.0150\text{ A})(0.0500\text{ m})(0.600\text{ T}) = 0.0450\text{ N}$ وهو الجواب نفسه الذي حصلنا عليه سابقًا بتطبيق قانون حفظ الطاقة.

تمرين (ب): ما اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الدائريّة الناتج من التيّار الموضّح في كلّ جزءٍ من (الشكل 21-11)؟

الشكل 21-11: (تمرين B).



21-3 القوّة الدافعة المتولّدة في موصل متحرّك

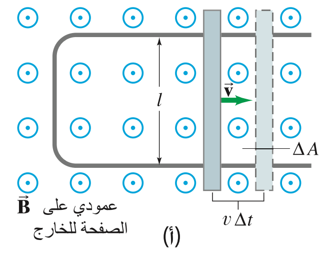
هنالك طريقةٌ أخرى لإنتاج قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ موضّحة في (الشكل 21-12أ) وهذا الوضع يساهم في توضيح طبيعة القوة الدافعة التأثيرية. افرض أنّ المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ عموديٌّ على المساحة المحصورة بالموصل الذي على شكل الحرف U والقضيب المتحرك موضوع عليه. إذا كان القضيب مُصَمَّمًا بحيث يتحرّك بسرعة v فإنّه يتحرّك مسافة $\Delta x = v\,\Delta t$ في زمن مقداره Δt. ومن خلال قانون فارادي، تتولّد قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ، يُعطى مقدارها كما يلي:

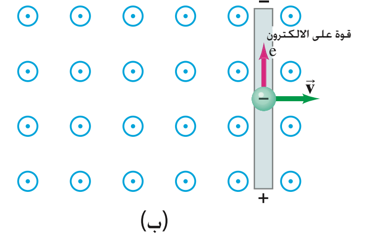
$$\mathscr{E} = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = \frac{B\,\Delta A}{\Delta t} = \frac{Blv\,\Delta t}{\Delta t} = Blv \qquad (3 - 21)$$

(المعادلة 21-3) مناسبة في حالة كون B, l, v متعامدة على بعضها بعضًا (إنْ لم تكن متعامدة فسنستخدم المركبات العموديّة فقط لكلٍّ منها). تُسَمّى القوّةُ الدافعة التأثيريّة المتولّدة من الموصل الذي يتحرّك في مجال مغناطيسي أحيانًا القوةَ الدافعة التأثيرية المتبادلة.

ومن جهةٍ أخرى، نستطيع إيجاد (المعادلة 21-3) دون استخدام قانون فارادي. رأينا في (الفصل 20) أنّ الجُسيمات المشحونة التي تتحرّك عموديًّا على المجال المغناطيسي B بسرعة v تتأثّر بقوّةٍ مقدارها (المعادلة 20-4) $F = qvB$ إذا كان القضيب في (الشكل 21-12أ) يتحرك إلى اليمين بسرعة v، فإنّ إلكترونات هذا القضيب تتحرك بهذه السرعة. لذا، وحيث إنّ $\vec{\mathbf{B}} \perp \vec{\mathbf{v}}$، فإنّ كلّ إلكترون يتأثر بقوة مقدارها $F = qvB$، والتي تؤثّر بشكلٍ عموديٍّ خارج الصفحة، كما هو موضّح (بالشكل 21-12ب). إذا كان القضيب غير متصل مع الموصل الذي على شكل حرف U، فإنّ الإلكترونات ستتجمّع على النهاية العلويّة للقضيب تاركةً النهاية السفلية موجبة (انظر الإشارات في الشكل 21-12 ب).

أخيرًا، تتشكّل قوّة محرّكة تأثيريّة. إذا وُضِعَ القضيب على الموصل الذي على شكل حرف U (شكل 21-12أ)، فإنّ الإلكترونات ستتحرك في هذا الموصل مشكلة تيارًا يتحرك مع اتجاه عقارب الساعة في العروة. ولحساب القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؛ نحسب الشغل اللازم لتحريك الشحنة q من أحد طرفي القضيب إلى الطرف الآخر $W = \text{force} \times \text{distance} = (qvB)(l)$. القوة الدافعة التأثيرية المتولدة تساوي الشغل المبذول لوحدة الشحنة. وعليه، تكون $\mathscr{E} = W/q = qvBl/q = Blv$، وهي النتيجة نفسها التي حصلنا عليها باستخدام قانون فارادي (معادلة 21-3).





الشكل 21-12
(أ) قضيب موصل يتحرك نحو اليمين على موصل على شكل حرف U في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{\mathbf{B}}$ عمودي على الصفحة للخارج.
(ب) القوة المؤثرة إلى الأعلى على الإلكترون في القضيب الفلزي (المتحرك نحو اليمين) بسبب المجال المغناطيسي الذي يؤثر عموديًا في الصفحة للخارج.

تمرين (ج): بأيّ اتجاه تتحرك الإلكترونات في (الشكل 21-12) إذا تحرّك القضيب نحو اليسار بحيث يقلل مساحة العروة؟

المثال 21-6 هل الطائرةُ المتحرّكةُ تولّدُ قوّةً دافعةً تأثيريّةً كبيرة؟ تتحرك طائرة بسرعة 1000 km/h في منطقة تكون فيها شدّة المجال المغناطيسي الأرضي $5.0 \times 10^{-5}\,\text{T}$ بشكلٍ عموديٍّ تقريبًا. (الشكل 21-13). ما فرق الجهد المتولد بين طرفي جناحي الطائرة إذا كانت المسافة بينهما 70 m؟

النّهج: يُعدّ الجناحان موصلًا طوله 70-m يتحرك في المجال المغناطيسي الأرضي. وباستخدام (المعادلة 21-3). نحصل على القوة الدافعة التأثيرية المتولدة.

الحلّ: لأنّ $v = 1000\,\text{km/h} = 280\,\text{m/s}$ و $\vec{\mathbf{v}} \perp \vec{\mathbf{B}}$ فإنّ

$$\mathscr{E} = Blv = (5.0 \times 10^{-5}\,\text{T})(70\,\text{m})(280\,\text{m/s}) = 1.0\,\text{V}$$

ملحوظة: فرق الجهد المتولد ليس كبيرًا حتى نأخذه بالحسبان.

الشكل 21 - 13 (المثال 21 - 6)



المثال 21-7 **قياس تدفق الدم بطريقة كهرومغناطيسية** يمكن قياس معدّل تدفق الدّم في أحد الأوعية الدمويّة في جسمنا باستخدام الجهاز الموضح في (الشكل 21 - 14) حيث إنّ الدم يحوي أيونات مشحونة. افرض أنّ قطر الوعاء الدموي 2.0 mm، وشدة المجال المغناطيسي 0.080 T، والقوة الدافعة التأثيرية المقيسة تساوي 0.10 mV. ما سرعة تدفق الدم؟

النّهج: يتجه المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ أفقيًّا من اليسار إلى اليمين (من القطب الشمالي N إلى القطب الجنوبي S). القوة الدافعة التأثيرية مؤثرة في الطول $l = 2.0\,\text{mm}$ من الوعاء الدموي (الشكل 21-14) العمودي على كلٍّ من $\vec{\mathbf{B}}$ و $\vec{\mathbf{v}}$ كما هو مبيّن في (الشكل 21-12). نستطيع استخدام (المعادلة 21-3) لإيجاد v.

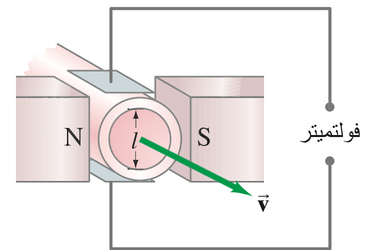
الحلّ: نحسب v من (المعادلة 21-3) فنحصل على

$$v = \frac{\mathscr{E}}{Bl} = \frac{(1.0 \times 10^{-4}\,\text{V})}{(0.080\,\text{T})(2.0 \times 10^{-3}\,\text{m})} = 0.63\,\text{m/s}$$

ملحوظة: في التطبيقات العمليّة الحقيقيّة، يُستخدم تيار كهربائي متردّد لإنتاج مجال مغناطيسي متردّد. وتكون القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة متردّدة.

تطبيق الفيزياء
قياس سرعة تدفق الدم

الشكل 21-14 قياس سرعة الدم من القوة الدافعة التأثيرية المتولدة، (المثال 21-7).



مثال إضافي

المثال 21-8 القوّةُ على قضيب: لجعل القضيب في (الشكل 21-12أ) يتحرك نحو اليمين بسرعة v؛ فإنّك بحاجة إلى تطبيق قوة خارجية على القضيب الفلزي لليمين.
(أ) فسّر القوة اللازمة وأوجد مقدارها. (ب) ما القدرة الخارجية اللازمة لتحريك القضيب؟ (لا تخلط بين هذه القوة الخارجية على القضيب من جهة، والقوة إلى الأعلى المؤثرة في الإلكترونات الموضحة في (الشكل 21-12 ب) من جهة أخرى.

النّهج: عندما يتحرك القضيب إلى اليمين، فإنّ الإلكترونات تتحرك إلى الأعلى في القضيب اعتمادًا على قاعدة اليد اليمنى -3 (ص 562). ويكون التيار التأثيري المتولد في القضيب نحو الأسفل. نستطيع أن نرى أيضًا من قانون لنز أنّ التدفق المغناطيسي إلى الخارج خلال العروة يزداد، والتيار التأثيري الناتج يجب أن يعاكس هذه الزيادة. لذلك، يكون التيار مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي إلى الداخل (قاعدة اليد اليمنى -1). القوة المغناطيسية المؤثرة في القضيب المتحرك $F = IlB$ لمجال مغناطيسي ثابت (المعادلة 20-2). وتدلّ قاعدة اليد اليمنى -2 على أنَّ القوة المغناطيسية المؤثرة تكون نحو اليسار، والقوة الساحبة يجب أن تعاكسها لتحريك القضيب تجاه اليمين.

الحلّ: (أ) القوة الخارجية نحو اليمين يجب أن توازن القوة المغناطيسية $F = IlB$. التيار $I = \mathscr{E}/R = Blv/R$ (انظر المعادلة 21-3) والمقاومة R هي المقاومة الكهربائية للدارة ككل، وتشمل القضيب والموصل الذي على شكل حرف U. وتكون القوة اللازمة لتحريك القضيب

$$F = IlB = \left(\frac{Blv}{R}\right)lB = \frac{B^2l^2}{R}v$$

إذا كانت B، l، R ثوابت، فإنّ السرعة الثابتة v تنتج من قوة ثابتة (ثبات R يعني أنّ السكتين المتوازيتين عديمتا المقاومة). والقدرة الخارجية اللازمة لتحريك القضيب ذي المقاومة الثابتة R هي

$$P_{\text{ext}} = Fv = \frac{B^2l^2v^2}{R}$$

القدرة المستنفدة في المقاومة هي $P = I^2R$ حيث: $I = \mathscr{E}/R = Blv/R$

$$P_{\text{R}} = I^2R = \frac{B^2l^2v^2}{R}$$

وتكون القدرة الداخلة مساوية للقدرة المستنفدة عند أيّ لحظة.

21-4 التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ ينتج مجالاً كهربائيًّا

وجدنا أنّ التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ ينتج قوّةً دافعةً تأثيريّةً، وتيارًا تأثيريًّا أيضًا. وهذا يقتضي وجود مجالٍ كهربائيٍّ في السلك بسبب حركة الإلكترونات فيه. وهذه النتيجة وغيرها تؤدّي إلى الاستنتاج التالي:

التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ ينتج مجالاً كهربائيًّا

وتطبّق هذه النتيجة العامة على أيّ حيّز في الفضاء يكون فيه تغيّر في المجال المغناطيسي، وليس فقط على الأسلاك وباقي الموصلات.

نستطيع الحصول على صيغة مبسَّطة للمجال E بدلالة B في حالة الإلكترونات في الموصل المتحرك كما هو مبين في (الشكل 21 - 12). تتأثر الإلكترونات بقوة نحو الأعلى (الشكل 21 - 12ب). وإذا وضعنا أنفسنا في محور إسناد الموصل فإنّ هذه القوة التي تسارع الإلكترونات تقتضي وجود مجال كهربائيّ في الموصل. يعرف المجال الكهربائي بأنّه القوة المؤثرة في وحدة الشحنات؛ أي $E = F/q$. وهنا تكون $F = qvB$ (المعادلة 20-4) والمجال الكهربائي المؤثر خلال القضيب يساوي:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{qvB}{q} = vB \qquad \textbf{(4-21)}$$

5-21 المولِّدات الكهربائيّة

ناقشنا التيّار المتردّد في (البند 18-7). والآن سنناقش كيفيّةَ توليد التيّار المتردّد (ac) بواسطة (**المولّد الكهربائي**) أو **الدينامو**، وهو واحد من أهمّ النتائج العمليّة لاكتشاف فارادي الكبير. إنّ المولّد الكهربائيّ يحوّل الطاقة الميكانيكيّة إلى طاقةٍ كهربائيّةٍ على عكس ما يحدث في المحرّك الكهربائيّ. وهناك مخطّطٌ مبسّطٌ لمولّد التيّار المتردّد موضّح في (الشكل 21-15). يتكوّن المولّد من عدّة لفّات من الأسلاك (واحدة فقط موضّحة في الشكل) ملفوفة على قلب أسطواني يستطيع الدوران في المجال المغناطيسيّ مع محورٍ مثبتٍ في مركزه. يدور المحور بطريقة ميكانيكيّة (سقوط ماء، هواء متحرك، توربين بخار، حزام المولد في السيارة) وبالتالي تتولّد قوّة دافعة تأثيرية في الملفّ الدوّار ممّا يولّد تيّارًا كهربائيًّا. لو افترضنا أنّ القلب الأسطواني في (الشكل 21-15) يدور مع اتّجاه عقارب الساعة، وعليه، فإنّ قاعدة اليد اليمنى -3 تطبق على الجسيمات المشحونة في السلك (أو من قانون لنز)، وتخبرنا إنّ التيار المتولد في فرع السلك الذي رمز إليه بالرمز b والملفوف على القلب الأسطواني يكون نحو الخارج، في حين يكون التيار في الفرع a نحو الداخل (كلّ فرع ثابت يشكل شريحة تدور مع القلب الأسطواني). بعد نصف دورة، يصبح الفرع b مكان الفرع a، لذا يصبح التيار المار في الفرع b نحو الداخل، ويكون التيار الناتج متردّدًا.

إنّ التردد f يساوي 60 Hz في كثير من بلدان العالم، كأمريكا وكندا وغيرها، في حين يساوي 50 Hz في بلدان أخرى كدول الخليج، في حين تكون بين المقدارين 50-60 Hz في كثير من الدول. وتُستخدم معظمُ المولّدات في العالم البخارَ ذا الضغط العالي الناتج من التسخين بواسطة الفحم، أو النفط، أو الغاز الطبيعي لإدارة التوربينات الموصولة بمحور المولّد. ويمكن استخدام الطاقة النووية أيضًا لإنتاج الطاقة الكهربائية. ويجب المحافظة على الترددين 50 Hz أو 60 Hz بدقة من قبل مصانع إنتاج الطاقة الكهربائية.

إنّ مولّد التيار المستمر (dc) يشبه مولّد التيّار المتردّد (ac) باستثناء أنّ الحلقات الشريحية على القلب الأسطواني تُستبدل بعواكس للتيار ذات حلقة مشقوقة، (الشكل 21-16أ)، كما هو مبيّن في محرّك التيّار المستمر. يمكن جعل الجهد الناتج متناسق الشكل بتوصيل مواسع على التوازي مع مخرج المولد (البند 16-9). أما الأكثر شيوعًا فهو استخدام عدد أكبر من اللفات على المحور كما في (الشكل 21-16 ب) مما ينتج جهدًا ثابتًا تقريبًا.

لقد استخدمت السيارات المولدات التي تنتج تيّارًا مستمرًّا (dc) في السابق، أمّا في هذه الأيام، فإنّها تستخدم مولدات للتيار المتناوب ممّا يجنّب مشاكل التلف أو الشرر الناتج حول الحلقات المشقوقة في عاكس التيار في مولد التيار المستمر. وتختلف مولدات التيار المتردد عن مولد التيار المستمر من حيث وجود مغناطيس كهربائي يدعى الدوّار، يغذّى من تيار بطارية، ويصنع بحيث يدور بواسطة حزام موصول مع الآلة البخارية. يمرُّ المجال المغناطيسي الناتج من الدوار خلال مجموعة من الملفّات الثابتة المحيطة به، منتجًا تيارًا في هذه الملفّات. يتحوّل هذا التيار المتردّد الناتج إلى تيّارٍ مستمرٍّ لشحن البطاريّة باستخدام ديود من مادّةٍ شبه موصلة ممّا يسمح للتيار بالتدفق باتجاه واحد فقط.

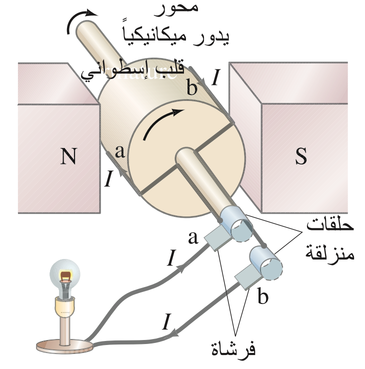
اشتقاق معادلة المولد

يرينا (الشكل 21-17) سلكٌ من لفّةٍ واحدةٍ على دوّار. العروة مصنوعة بحيث تدور مع اتجاه عقارب الساعة في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$. وسرعة الضلعين ab، و bc عند لحظة معينة موضحة في الشكل. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ ضلعي السلك bd، و da يتحركان بحيث تكون القوة المؤثرة في الإلكترونات فيهما باتجاه أطراف السلك وليس مع طوله. وتكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة بسبب القوة المؤثرة على الشحنات في الجزأينab ، و cd. من قاعدة اليد اليمنى -3 ، نرى أنّ التيار التأثيري المتولد في ab يكون من a باتجاه b، أمّا في الجزء السفلي، فيكون من c باتجاه d، ويستمر التدفق في العروة. ويعطَى مقدارُ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في ab من (المعادلة 21-3) باستثناء أنه علينا أخذ مركبة السرعة العمودية على B:

$$\mathscr{E} = Blv_{\perp}$$

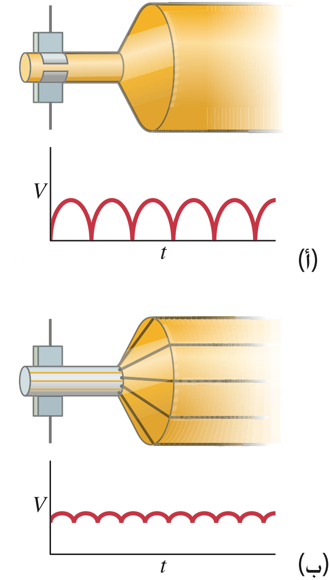
حيث l هو طول الضلع ab. ونلاحظ من (الشكل 21-17) أنّ $v_{\perp} = v\sin\theta$؛ حيث θ هي الزاوية التي يصنعها وجه العروة مع الاتجاه الرأسي. إنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في cd لها المقدار نفسه وبالاتجاه ذاته، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الكلية المتولدة هي حاصل جمع الاثنتين وتساوي

$$\mathscr{E} = 2NBlv\sin\theta$$

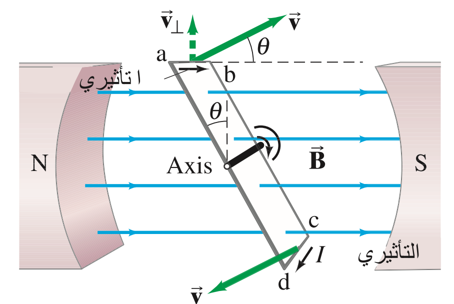


الشكل 21-15 مولّد للتيار المتردد

الشكل 21-16 (أ) مولد تيار مستمر مع عاكس واحد للتيار. (ب) مولد تيار مستمر مع عدة عواكس للتيار وعدة لفات.



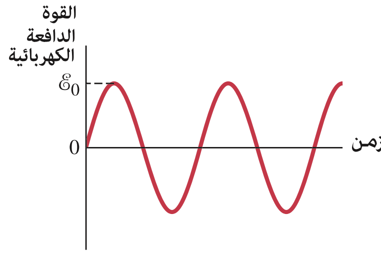
الشكل 21-17 القوة الدافعة التأثيرية تتولد في الضلعين ab، و cd حيث إن مركبات السرعة لهما عمودية على المجال B وتساوي $v\sin\theta$



إذا كان الملفُّ يدور بسرعة زاوية ثابتة ω، فإنّ الزاوية $\theta = \omega t$. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ لدينا المعادلات الزاوية (معادلة 8 - 4) وهي $v = \omega r = \omega(h/2)$ حيث h هي طول bc و ad. وتكون $\mathscr{E} = 2NB\omega l(h/2)\sin\omega t$ أو

$$\mathscr{E} = NB\omega A \sin\omega t \quad \textbf{(5-21)}$$

حيث $A = lh$ هي مساحة العروة. إنّ هذه المعادلة صالحة لأيّ شكل من الملفّات وليس فقط الملفات المستطيلة كما في الاشتقاق السابق. لذا، تكون القوة الدافعة التأثيرية الناتجة على شكل موجة جيبية مترددة (انظر الشكل 21-18 والبند 18 - 7). ولأنّ ω تكون بوحدة الراديان لكلّ ثانية $(radians/s)$ نستطيع أن نكتب $\omega = 2\pi f$، حيث f هو التردد.



الشكل 21-18 مولد كهربائي للتيار المتردد: القوة الدافعة التأثيرية الناتجة هي $\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin\omega t$ حيث $\mathscr{E}_0 = NA\omega B$ (معادلة 21-5)

6-21 القوّة الدافعة التأثيريّة الراجعة، والعزم المعاكس، والتيّارات الدواميّة

*القوّة الدافعة التأثيريّة الراجعة

يدور المحرّك الكهربائي، ويولّد طاقةً ميكانيكية عندما يمرّ فيه تيارٌ كهربائي. من وصفنا في (البند 20 - 10) لمحرك التيّار المستمرّ البسيط، تستطيع التّوقّع بأنّ الدوار داخل المحرك يتسارع بسبب عزم الازدواج المؤثر فيه. ومن جهة أخرى، يؤدي دوران الدوَّار إلى تغيّر التدفق المغناطيسي خلال الملف، وبذلك تتولد قوة دافعة تأثيرية. تؤثر هذه القوة الدافعة التأثيرية بحيث تعاكس الحركة **(قانون لنز)** وتُسَمّى القوّة الدافعة التأثيرية الراجعة أو القوة الدافعة التأثيرية المعاكسة. كلّما كانت سرعة المحرك أكبر، كانت القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أكبر أيضًا. يدور المحرك ويبذل شغلًا على شيءٍ ما، ولكن إذا لم يكن هنالك أيّ حمل، فإنّ سرعة المحرك تزداد إلى أن تصبح القوة الدافعة التأثيرية الراجعة مساوية لفرق الجهد الداخل. وعندما يكون هنالك حمل ميكانيكي، فإنّ سرعة المحرك تكون محدودة بواسطة الحمل، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أقلّ من فرق الجهد الخارجي المطبق. وكلما كان الحمل الميكانيكي أكبر، كانت سرعة دوّار المحرك أقلّ، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أقلّ ($\mathscr{E} \propto \omega$، المعادلة 21 - 5).

المثال 21-9 القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في محرك كهربائي

إذا كانت مقاومة لفّات الدوار لمحرك تيار مستمر تساوي $5.0\ \Omega$ ووصل المحرك بجهد مقداره $120\ V$. عندما يصل المحرك إلى أقصى سرعة ضد حمله العادي، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تساوي $108\ V$. احسب ما يلي:

(أ) التيار المار في المولد عند لحظة تشغيله.

(ب) التيار عندما يصل المحرك أقصى سرعة.

النّهج: عندما يبدأ المحرك بالدوران، تكون سرعته بطيئة. ولذلك، لا تكون هنالك قوة دافعة تأثيرية راجعة. ويكون فرق الجهد الوحيد هنا 120-V، ويعطى التيار من قانون أوم حيث $R = 5.0\ \Omega$. وعند السرعة القصوى، نأخذ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة بالحسبان مع الجهد المطبق الذي يساوي 120-V.

الحلّ: (أ) عند لحظة التشغيل، فإنّ التيار ينتج من تطبيق جهد مقداره $120\ V$ على الملف الذي مقاومته $5.0\ \Omega$ ومن قانون أوم يكون

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\ V}{5.0\ \Omega} = 24\ A$$

(ب) عندما يصل المحرك أقصى سرعة، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تؤخذ بالحسبان في الدارة المكافئة كما هو موضح في (الشكل 21 - 19). في هذه الحالة ومن قانون أوم (أو قاعدة كيرتشوف) تكون

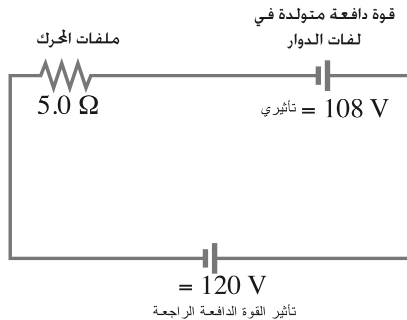
$$120\ V - 108\ V = I(5.0\ \Omega)$$

ولذلك يكون

$$I = \frac{12\ V}{5.0\ \Omega} = 2.4\ A$$

ملحوظة: توضّح هذه النتيجة أنّ التيار يكون كبيرًا جدًّا عندما يبدأ المحرك بالدوران، وهذا يبيّن خفوت الضوء في منزلك بعد فترة وجيزة من تشغيل المولد الكهربائي. إنّ التيار الابتدائي الكبير يجعل فرق الجهد الخارج يتناقص؛ حيث إنّ أسلاك المنزل لها مقاومة، وهنالك تناقص في الجهد حولها عندما تسري فيها تيارات كبيرة.

الشكل 21-19 تحتوي دارة محرك كهربائي على قوة دافعة تأثيرية راجعة. (المثال 21-9)).



تأثير القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في التيار.

المثال المفاهيمي 21-10 الحملُ الزائد للمحرّك الكهربائيّ

عند استخدام أداةٍ مثل الخلاط، أو المثقاب الكهربائي، أو مكنة الخياطة، فإنّه عندما يصبح الحمل زائدًا على الأداة، فإنّ الأداة تتباطأ بشكل واضح أو تتوقف. وإذا بقي مصدر القدرة موصولًا، فإنّ الأداة ستحترق أو تتلف. فسّر سبب ذلك.

الجواب: تصمم المحركات الكهربائية لتعمل بسرعة معينة عند فرق جهدٍ معيّن. لذا، فالمصمّمون يأخذون بالحسبان القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أو المعاكسة. عندما تقل سرعة الدوران، فإنّ قيمة القوة الدافعة التأثيرية الراجعة لا تصبح كبيرة كما هو متوقع ($\mathscr{E} \propto \omega$، المعادلة 21 - 5). وعليه، سيزداد التيار، وقد يصبح كبيرًا بما فيه الكفاية بحيث تزداد حرارة لفات المحرك إلى الدرجة التي تؤدي إلى إتلاف المحرك.

تطبيق الفيزياء
احتراق المحرك

*العزم المعاكس

العزم المعاكس

في المولّدات، يكون الوضع عكس ما هو عليه في المحركات. كما رأينا، فإنّ الدوران الميكانيكي لقلب المولد (الدوّار) يولد قوة دافعة تأثيرية في العُرى. فإذا كان المولد غير موصول بدارة خارجية، فإنّ القوة الدافعة المتولدة تؤثر في أطراف المولد، ولكن دون وجود تيار. في هذه الحالة، تبذل جهود قليلة لإدارة القلب الدوّار. ولكن إذا وصل المولد بأداة تستهلك تيارًا، فإنّ التيار يمر في الملف الدوار. ولأنّ هذا الملف الذي يحمل تيارًا موجود في مجال مغناطيسي خارجي، فإنه سيتأثر بعزم ازدواج (مثل المحرك) وهذا العزم يعاكس الحركة (استخدم قاعدة اليد اليمنى- 2 لتحديد اتجاه القوة في السلك في الشكلين 21-15 و 21-17). يُسَمّى هذا العزمُ العزمَ المعاكس (*Counter torque*). كلما كان الحمل الكهربائي أكبر(أي كلّما كان التيار المستهلك أكبر) كان العزم المعاكس أكبر أيضا. وهنا يجب أن يكون العزم الخارجي المطبق (المؤثر) أكبر حتى يستمر المولد في الدوران. ويمكن فهم هذا منطقيًا من قانون حفظ الطاقة. إذن، نحتاج إلى بذل طاقة ميكانيكية أكبر لإنتاج طاقة كهربائية أكبر.

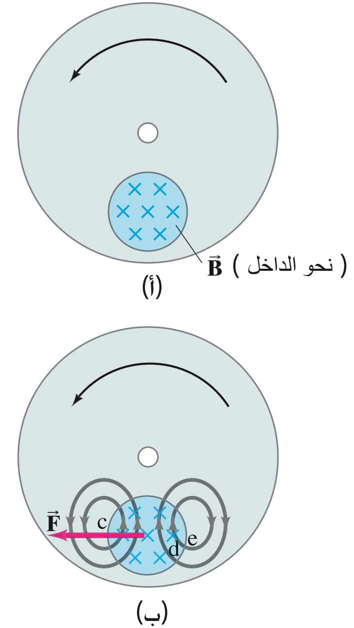
* التيارات الدوّامية

إنّ التيّارات التأثيريّة لا تقتصر على مسارٍ محدّدٍ دائمًا كما في الأسلاك. خذ مثلًا عجلةً فلزيةً دوارة كما هو مبيّن في (الشكل 21-20أ). إذا طُبّق مجال مغناطيسي خارجي لداخل الورقة على مساحة محدودة من العجلة كما هو موضّح، فإنّ الجزء من العجلة الذي يكون في المجال المغناطيسي يمتلك قوة دافعة تأثيرية بسبب دوران الموصل الذي يحمل إلكترونات داخله. إنّ تدفق التيار المقترح في العجلة يكون نحو الأعلى في حيّز المجال المغناطيسي (الشكل 21-20ب)، والتيار يتدفق بمسار سفلي معاكس خارج هذا الحيّز. لماذا؟ اعتمادًا على قانون لنز، فإنّ التيارات التأثيرية تعاكس التغير الذي يسببها. خذ الجزء من العجلة الذي رمزنا إليه بالرمز c في (الشكل 21-20ب) حيث المجال المغناطيسي فيه يساوي صفرًا، ولكنه قريب من الوصول إلى الحيز الموجود فيه المجال $\vec{\mathbf{B}}$ لداخل الورقة. ولمعاكسة هذه الزيادة في المجال المغناطيسي للداخل؛ فإنّ التيار التأثيري المتولد يجب أن يكون عكس اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي يشير إلى خارج الورقة (قاعدة اليد اليمنى -1). وبالكيفية نفسها، فإنّ الحيز d على وشك الحركة لـ e حيث يساوي صفرًا. وهنا، فإنّ التيار يكون مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي للداخل لمعاكسة النقصان في التدفق للداخل. هذه التيارات تُسَمّى **التيارات الدوامية** (*eddy currents*) ويمكن أن تظهر في أيّ موصلٍ يتحرّك خلال مجال مغناطيسي بحيث يتغير التدفق.

في (الشكل 21-20 ب)، يؤثّر المجال المغناطيسي بقوة $\vec{\mathbf{F}}$ في التيار التأثيري المتولّد، وهذه القوة تعاكس الحركة الدورانية. ويمكن استعمال التيارات الدوامية بهذه الطريقة كأداة إيقاف للسيارات. لإيقاف السيارة: نشغّل مغناطيسًا كهربائيًّا بحيث يطبق مجاله على العجلات أو على القضبان الحديدية المتحركة في الأسفل.

كما يمكن استعمال التيارات الدوامية أيضًا لتقليل ذبذبات نظام معين. وقد تكون التيارات الدوامية من جهة أخرى مشكلة، فمثلا: التيارات المتولدة في القلب الدوار في المحرك أو المولد ينتج حرارة ($P = I\mathscr{E}$) وتضيع طاقة. ولتقليل التيارات الدوامية: فإنّ الدوّار يصنع من شرائح فلزية من الحديد مفصولة بعضها عن بعض. الطول الكلي لمسار التيارات الدوامية مقيد لكلّ شريحة مما يزيد المقاومة الكليّة، وبالتالي يقلّ التيار، فتقلّ الطاقة الضائعة.

الشكل 21-20
إنتاج التيارات الدوامية في عجلة دوارة



في المطارات (الشكل 21-21) تكشف الأجسام الفلزية باستخدام الحثّ الكهرومغناطيسي والتيارات الدواميّة. توضع عدة ملفات في الجدران التي يمرّ من خلالها الأشخاص بإيقاعات مختلفة. وبتقنية تُسَمّى (حث النبضة). حيث تعطى الملفات نبضات متكررة من التيار (بحدود المايكرو ثانية) مئات أو آلاف المرات في الثانية الواحدة. تنتج كلّ نبضة في الملف مجالا مغناطيسيًّا لفترةٍ زمنيةٍ قصيرة جدًّا. عندما يمرّ المسافر خلال الجهاز، فإنّ أيّ جسم فلزي محمول سوف يحوي تيارات دوامية تتكون فيه. وتظهر هذه التيارات الدوامية بعد كلّ نبضة مدخلة. ومن ثمّ يتكون مجال مغناطيسي بسيط نتيجة هذه التيارات (قبل النبضة التالية) يمكن كشفه باستخدام جهاز إنذار؛ كما تستخدم المخازن والمكتبات أيضا أنظمة مشابهة للقبض على اللصوص.

تطبيق الفيزياء

كواشف الفلزات في المطارات



الشكل 21-21 كواشف الفلزات في المطارات

7-21 المحوّلات ونقل القدرة

المحوّل أداةٌ تُستخدم لزيادة فرق الجهد المتردّد أو إنقاصه. وهذه المحوّلات موجودةٌ في كلّ مكان؛ في التلفاز لإعطاء فرق جهدٍ كبيرٍ في أنبوبة الصورة، وفي أجهزة تضخيم الصوت المحمولة (الستيريو)، وعلى أعمدة الكهرباء (الشكل 21-22) لخفض فرق الجهد العالي الناتج من المولدات في شركات الكهرباء إلى الجهد المستخدم في المنازل(120 V أو 240 V) وهناك العديد من التطبيقات الأخرى. يتكون المحول من ملفين؛ أحدهما يُسَمّى الملف الابتدائي، والآخر يُسَمّى الملفّ الثانوي. ويشترك الملفّان بقلبٍ من الحديد مُصَمَّمٍ بحيث يقلّل من تأثير التيارات الدوامية (البند 21-6) كما هو موضح في (الشكل 21-23). تصمم المحولات بحيث يمرّ التدفق المغناطيسي جميعه (تقريبًا) الناتج من التيار في الملف الابتدائي خلا ل الملف الثانوي، وسنفترض أنّ هذا صحيح فيما سيمر معنا لاحقًا. كذلك فإننا سنفترض أنّ الطاقة المفقودة يمكن إهمالها (في المقاومة والتخلف). تقريب جيد للمحوّلات الحقيقية يعطينا كفاءة أفضل من 99%.



الشكل 21-22 إصلاح محوّل كهربائي على عمود للكهرباء

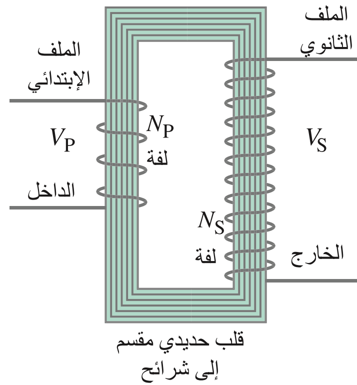
عندما يطبق فرق جهد متردد على الملف الابتدائي، فإنّ التغير في المجال المغناطيسي ينتج فرق جهد تأثيري بالتردد نفسه في الملف الثانوي. ومن ناحية أخرى، فإنّ فرق الجهد المتولد سوف يكون مختلفًا اعتمادًا على عدد اللفات في كلّ ملف. ومن قانون فارادي، فإنّ فرق الجهد أو القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف الثانوي هي

$$V_S = N_S \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

حيث N_S هي عدد لفّات الملفّ الثانوي، أمّا $\Delta \Phi_B / \Delta t$ فهي المعدّل الذي يتغيّر فيه التدفق المغناطيسي. يتناسب فرق الجهد المدخل للملف الابتدائي V_P مع معدل تغيّر التدفق خلاله حسب المعادلة

$$V_P = N_P \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

حيث N_P هي عدد لفّات الملفّ الابتدائي. وإذا قسمنا هاتين المعادلتين على بعضهما بعضًا بفرض عدم ضياع في التدفق، فسنحصل على:



الشكل 21-23 محوّل كهربائي رافع للجهد$(N_P = 4, N_S = 12)$

Transformer equation

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad \textbf{(6-21)}$$

تخبرنا *معادلة المحوّل* هذه كيفية ارتباط فرق جهد الملف الثانوي (الخارج) مع فرق جهد الملف الابتدائي (الداخل). V_S، و V_P في (المعادلة 21-6) يمكن أن تكون قيمة جذر متوسط المربعات rms لكلا الجهدين V_S أو V_P (البند 18-7) أو القيمة القصوى (peak value) لكليهما. إنّ فرق الجهد المستمر DC لا يعمل في المحولات الكهربائية؛ بسبب عدم وجود تغيّر في التدفق المغناطيسي.

إذا كان عدد لفّات الملفّ الثانوي أكبر من عدد لفّات الملفّ الابتدائي ($N_S > N_P$)، فسيكون لدينا **محوّل رافع للجهد (step –up)**. ويكون فرق جهد الملفّ الثانوي أكبر من فرق جهد الملف الابتدائي. فمثلًا: إذا كان عدد لفّات الملفّ الثانوي ضعف عدد لفّات الملفّ الابتدائي، فإنّ فرق جهد الملفّ الثانوي يكون ضعف فرق جهد الملف الابتدائي. وإذا كانت N_s أقلّ من N_p، فسيكون لدينا **محوّل خافض للجهد (step – down)**.
وعليه، فإنّ فرق الجهد المتردّد يمكن أن يزداد (أو ينقص) باستخدام المحوّلات، وهذا لا يحصل بلا مقابل. فقانون حفظ الطاقة يشير إلى أنّ القدرة الناتجة لا يمكن أن تكون أكبر من القدرة الداخلة. وتكون كفاءة المحوّل المصمّم جيدًا أكبر من 99%، أي أنّ طاقة قليلة جدًّا تضيع على شكل حرارة. والقدرة الخارجة تساوي القدرة الداخلة تقريبا، حيث إنّ $P=IV$ (معادلة 18-5) يكون

$$I_P V_P = I_S V_S$$

أو:

معادلة المحول الثانية

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \qquad \textbf{(7 - 21)}$$

المثال 21-11 محوّل الراديو (المذياع) المنزلي

يستخدم محوّل في المذياع المنزلي لتحويل فرق الجهد المتردّد من 120-V إلى 9.0-V (هذه الأداة تحوي أيضًا ديود يحوّل 9.0-V من فرق جهد متردّد إلى ثابت ليصبح مثل بطارية فرق جهدها 9.0-V). إذا كان الملفّ الثانوي يحوي 30 لفةً، وكان الراديو يستهلك تيارًا مقداره 400 mA، فاحسب ما يلي: (أ) عدد لفّاتِ الملفّ الابتدائي. (ب) التيار في الملف الابتدائي. (جـ) القدرة المحوّلة.

النّهج: نفترض أنّ المحوّل هنا هو محــوّلٌ مثاليٌّ دون ضياع في التدفق. وعليه، نستطيع تطبيق (المعادلة 21-6) ثم (المعادلة 21-7).

الحلّ: (أ) المحول هنا هو محوّل خافض للجهد. ومن (المعادلة 21-6) نحصل على

$$N_P = N_S \frac{V_P}{V_S} = \frac{(30)(120\ \mathrm{V})}{(9.0\ \mathrm{V})} = 400\ \mathrm{turns}$$

(أ) من (المعادلة 21-7) نحصل على

$$I_P = I_S \frac{N_S}{N_P} = (0.40\ \mathrm{A})\left(\frac{30}{400}\right) = 0.030\ \mathrm{A}$$

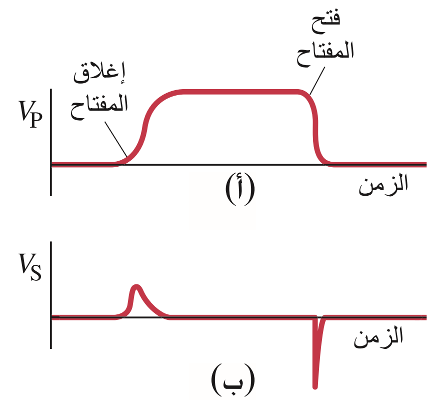
(جـ) القدرة المحوّلة هي

$$P = I_S V_S = (0.40\ \mathrm{A})(9.0\ \mathrm{V}) = 3.6\ \mathrm{W}$$

ملحوظة: القدرة في الملفِّ الابتدائي هي $P = (0.030\ \mathrm{A})(120\ \mathrm{V}) = 3.6\ \mathrm{W}$ وهي القدرة نفسها في الملف الثانوي. لذا، تكون كفاءة المحوّل في نقل القدرة الكهربائيّة لهذا المحوّل المثالي 100%.

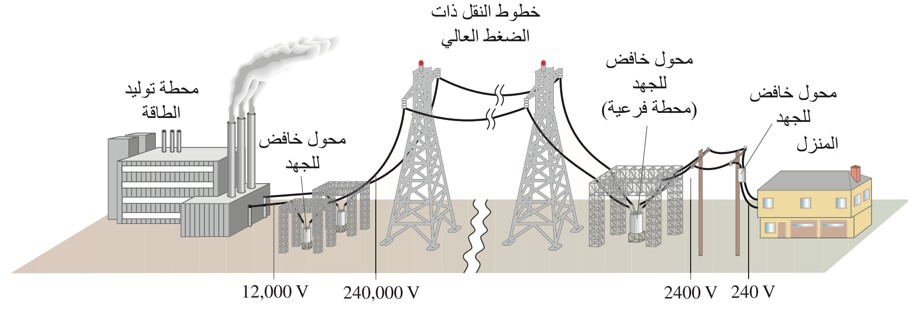
تمرين د: كم عدد اللفّات التي يجب أن يحتويها الملفّ الثانوي في (المثال 21-11) ($N_P = 400$ turns) إذا كان الملفّ يعمل على تقليل فرق الجهد من 120-V ac إلى 3.0-V ac؟

الشكل 21 - 24 عند تطبيق فرق جهد مستمر يفتح ويغلق كما هو مبين في (أ) ينتج نبضات جهد في الثانوي (ب) تدريج الجهد في (أ) و (ب) غير متساوي.



يعمل المحوّل على فرق جهدٍ متردّد فقط. وتطبيق فرق جهد ثابت على الملف الابتدائي لا ينتج تغيّرًا في التدفق. أي، لا تتولّد قوّة دافعة تأثيرية في الملف الثانوي. ومن جهة أخرى، إذا قمنا بتطبيق جهد ثابت للحظة معيّنة عن طريق فتح المفتاح وإغلاقه، فسيتكون تيار تأثيري في الملفّ الثانوي. على سبيل المثال، عند تطبيق جهد ثابت وإغلاقه في دارة الملف الابتدائي كما هو موضّح في (الشكل 21-24أ)، فإنّ الجهد التأثيري الناتج في الملفّ الثانوي يكون كما هو موضّح في (الشكل 21-24 ب). لاحظ أنّ جهد الملفِّ الثانويِّ يصبح صفرًا عند تطبيق فرق الجهد المستمرّ لفترةٍ طويلة. هذا هو أساس عمل نظام الاشتعال في السيارة. إنّ فرق الجهد العالي يطبق لإنتاج شرارة في التجويف الذي توضع فيه شمعة الاشتعال (البوجيّة) التي تشعل مزيج البنزين والهواء. ويعمل المحوّل المستخدم هنا كملفِّ إشعال، حيث يحول الـ 12 V الناتجة من البطاريّة (عند غلق دارة الملف الابتدائي) إلى مسمار (spike) يصل جهده إلى 30 kV يؤخذ من الملفّ الثانوي.

تطبيق الفيزياء
نظام الاشتعال في السيارة



الشكل 21 - 25 عملية نقل القدرة الكهربائية من مولدات القدرة للبيوت تستخدم خلالها المحولات الكهربائية على مراحل مختلفة.

تؤدّي المحوّلات دورًا مهمًّا في نقل الكهرباء. تقع مولّدات الكهرباء عادةً على مسافةٍ معيّنةٍ من قاطني المدن والقرى. لذا، يجب نقل الكهرباء إلى مسافاتٍ بعيدةٍ (الشكل 21-25). هنالك دائمًا فقدان للقدرة في خطوط النقل. وهذا الفقدان يمكن تقليله إذا كانت القدرة تنتقل من جهد مرتفع باستخدام المحوّلات كما يرينا المثال التالي:

تطبيق الفيزياء
تساعد المحولات في نقل القدرة الكهربائية

المثال 21-12 **خطوط نقل القدرة** ينقل في المتوسط 120 kW من القدرة الكهربائيّة إلى قريةٍ صغيرةٍ تبعد 10 km عن مولّد القدرة. إذا كانت المقاومة الكلية لخطوط النقل $0.40\,\Omega$، فاحسب القدرة الضائعة إذا نقلت القدرة من مصدر يعطي: (أ) 240 V . (ب) 24,000 V.

النّهج: لا نستطيع استخدام $P = V^2/R$؛ لأنّه إذا كانت R هي مقاومة خطوط النقل، فإنّنا نعرف الجهد الذي يتناقص خلالها، حيث إنّ فرق الجهد المُعطى يطبّق على الخطوط والحمل (القرية) مع بعضها بعضًا. ولكن نستطيع تحديد التيار I في الخطوط $(= P/V)$ وبالتالي، فإنّ القدرة تضيع من $P_L = I^2R$ لكلتا الحالتين (أ)، و (ب).

الحل: (أ) إذا أرسلت 120 kW على فرق جهد 240 V، فإنّ التيار الكلي سيكون

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5\ \text{W}}{2.4 \times 10^2\ \text{V}} = 500\ \text{A}$$

وتساوي القدرة الضائعة P_L في خطوط النقل

$$P_L = I^2R = (500\ \text{A})^2(0.40\ \Omega) = 100\ \text{kW}$$

وهناك أكثر من 80% من القدرة سوف يضيع في خطوط النقل على شكل حرارة.

(ب) إذا أرسلت 120 kW على فرق جهد 24.000 V، فسيكون التيار الكلي

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5\ \text{W}}{2.4 \times 10^4\ \text{V}} = 5.0\ \text{A}$$

وتساوي القدرة الضائعة في خطوط النقل

$$P_L = I^2R = (5.0\ \text{A})^2(0.40\ \Omega) = 10\ \text{W}$$

وهي أقلّ من $\frac{1}{100}$ لـ 1%

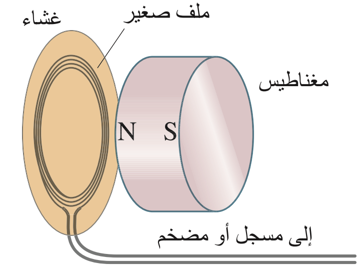
ملحوظة: لاحظنا أنّه كلّما كان فرق الجهد أكبر كان التيار أقلّ. ولهذا، تكون الطاقة الضائعة على شكل حرارة في خطوط النقل أقلّ. ولهذا السبب، فإنّ القدرة الكهربائيّة تنقل على جهدٍ عالٍ جدًّا مثل 700 kV.

إنّ **الخاصية الكبيرة للجهود المتردّدة**، والتي هي سبب استخدامها الواسع هي أنّ الجهد يتغيّر بسهولة زيادة أو نقصانًا بواسطة المحوّل. الجهد الخارج من المولّدات يرفع لنقله، وعند وصوله إلى المدن، يخفض على عدّة مراحل عند محطّات كهربائيّة قبل توزيعه على البيوت. إنّ الجهد على الخطوط الموجودة في شوارع المدن يكون عادةً 2400 V ويخفض إلى 240 V أو 120 V للاستخدامات المنزلية بواسطة المحوّلات (انظر الشكلين 21 - 22، و 21 - 25).

8-21 تطبيقات على الحث: أنظمة الصوت، ذاكرة الحاسوب، جهاز الرصد الزلزالي (السيزموجراف)، دارة قطع التيار (GFCI).

الميكروفون

هنالك أنواعٌ مختلفةٌ من الميكروفونات التي يعمل كثيرٌ منها على مبدأ الحث. أحد أشكال الميكروفونات يعمل عكس عمل سمّاعة الصوت (البند 20-10). يوصل ملفٌّ صغيرٌ بغشاء، ثمّ يُوضع قريبًا من مغناطيس طبيعيٍّ كما هو موضّح في (الشكل 21-26). يتحرّك الملفّ في المجال المغناطيسي عندما تصطدم موجات الصوت بالغشاء. وهذه الحركة تولّد قوّة دافعة تأثيرية. إنّ تردّد القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة هو تردّد الأمواج الصوتيّة الصادرة نفسه. وهذه القوّة الدافعة التأثيريّة تولّد إشارة يمكن تضخيمها وإرسالها إلى السمّاعة أو أيّ مُسْتَقْبِل.



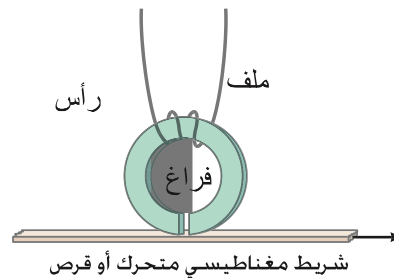
الشكل 21-26 مخطط للميكروفون الذي يعمل بواسطة الحث

تطبيق الفيزياء
الحواسيب والمعلومات الرقمية

القراءة والكتابة على الشريط والأقراص

إنّ التسجيل والقراءة من الأشرطة أو الأقراص يكون باستخدام رؤوس مغناطيسية. تحوي أشرطة التسجيل المرئية أو المسموعة طبقة رقيقة من أكسيد مغناطيسي على شريط بلاستيكي رفيع. عند التسجيل، ترسل إشارة الأوديو أو الفيديو (المسموعة أو المرئية) إلى رأس التسجيل الذي يؤثر كمغناطيس كهربائي رفيع (الشكل 21-17) فيُمغنط الأجزاء الرقيقة من الشريط الذي يمرُّ على فتحة ضيقة على الرأس في كلّ لحظة. وعند تشغيل الشريط، فإنّ التغيرات المغناطيسية للشريط المتحرك خلال الفتحة تسبب تغيرات مصاحبة، تغيّر المجال المغناطيسي خلال الرأس الفلزي، وهذا يولّد قوّة دافعة تأثيريّة في الملف (قانون فارادي). هذه القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة هي الإشارة الخارجة التي يمكن تضخيمها وإرسالها إلى السمّاعة (أوديو) أو الشاشة (فيديو). في مسجلات الصوت (الأوديو) والصورة (الفيديو) تكون الإشارات متشابهة، وتتغيّر سعتها بشكلٍ مستمرٍّ مع الزمن. التغيّر في درجة تمغنط الشريط عند أيّ نقطة يعكس التغيّر في السعة والتردّد للإشارتين الصوتيّة أو المرئيّة.

إنّ المعلومات الرقمية كالمستخدمة في أقراص الحاسوب (القرص الصلب أو الأقراص المرنة) أو في أشرطة الحاسوب المغناطيسية، وبعض أنواع أشرطة التسجيل الرقمية تُكتب وتُقرأ بواسطة رؤوس كالمشروحة مسبقًا (الشكل 21-27). الفرق الجوهري في الإشارات التي لا تكون تناظرية ولكنّها رقميّة، وبشكلٍ جزئيٍّ ثنائية، وتعني أنّ هنالك قيمتين ممكنتين فقط للعدد الكبير من المساحات الموجودة على الشريط أو القرص التي سبق تحديدها. القيمتان الممكنتان هما 0، و1. إنّ فرق جهد الإشارة لا يتغيّر بشكل مستمر، ولكنه يأخذ قيمتين $+5\ \text{V}$ أو $0\ \text{V}$ فقط. على سبيل المثال تعود لـ1 أو 0. ولذلك، فإنّ المعلومات تحمل كسلسلة من القطع الصغيرة (*bits*). كلّ منها يمكن أن يمتلك قيمتين فقط 1 أو 0.



(أ)



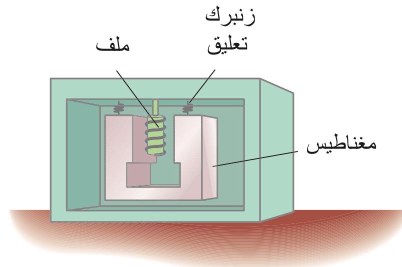
(ب)

الشكل 21-27 (أ) الرأس المستخدم في القراءة والتسجيل على الشريط أو القرص. في الكتابة أو التسجيل، الإشارة الكهربائية الداخلة للرأس الذي يؤثر كمغناطيس كهربائي تمغنط المكان الذي تمر عليه على الشريط أو القرص. في القراءة، يولد تغيرُ المجال المغناطيسي على الشريط المتحرك تغيراتٍ في المجال المغناطيسي للرأس، مما يولد بدوره قوة دافعة تأثيرية في الملف وهي الإشارة الخارجة.
(ب)صورة لأداة صلبة ترينا عدة أقراص ورؤوس تستخدم للقراءة والكتابة، وتستطيع التحرك بسرعة من حافة القرص إلى مركزه.

بطاقة الصراف الآلي

عندَ وضعِ بطاقةِ الصرّافِ في محلٍّ تجاريٍّ أو محطَّةِ وقود، فإنّ الشريط المغناطيسي الموجود على ظهر البطاقة يمرُّ على رأس قارىء كالموجود في المسجل أو الحاسوب. يحتوي الشريط المغناطيسي على معلومات شخصية عن الرصيد، ويكون متصلًا مع خط هاتف لإثبات أنّ الرصيد قابل للاستخدام.

جهاز الرصد الزلزالي (السيزموجراف)

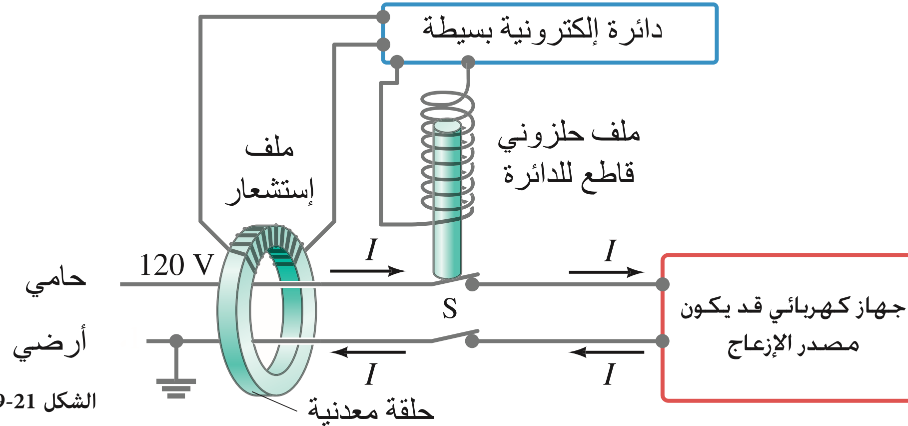


الشكل 21-28 أحد أنواع أجهزة الرصد الزلزالي.

يُستخدم جهاز الرصد الزلزالي في الجيوفيزياء لقياس شدّة موجات الهزّات الأرضيّة باستخدام مغناطيس وملف، أحدهما ثابت، والآخر متحرك (معلق بواسطة زنبرك، الشكل 21-28). تولّد الحركة النسبية للمغناطيس والملف عندما تحدث هزّة أرضيّة قوّة دافعة تأثيرية

دارة قطع التيار

قواطع التيار (الفيوزات) (البندان 18-16، و20-7) تحمي المباني من الحرائق والأجهزة من التلف عند مرور تيارات عالية غير متوقعة، ولكنّها لا تقطع التيار إلا إذا كان كبيرًا بحيث يسبب هلاك الإنسان وتتوافر الحماية إذا كانت سرعة قطع التيار كافية. تستخدم دارة قطع التيار للحماية، ويمكن أن تتفاعل مع تيارات أصغر من 5m A.



الشكل 21-29 دارة قطع التيار (GFCI)

يُعدّ الحثّ الكهرومغناطيسي الأساس الفيزيائي لعمل دارة قطع التيار، كما هو موضّح في (الشكل 21-29)، فإنّ خطّي القدرة الكهربائية الموصولين بجهاز معيّن (بالأحمر) يمرّان خلال حلقة فلزية صغيرة، وحول الحلقة، هنالك لفات من سلك رفيع يعمل كملف حساس. في الظروف العادية، يوازَن التيار المار في السلك حامي تمامًا بواسطة التيار الراجع في السلك المتعادل. إذا حدث خطأ ما، فإنّ السلك حامي يلامس الفلز غير الموصول بالأرضي في الجهاز المستخدم، بعض التيار يمكن أن يمر بجسم الشخص الذي يلامس الجهاز مرورًا بالأرض، والتيار العائد في السلك المتعادل سيصبح أقلّ من التيار المار في السلك الساخن، وسيكون هنالك تيار صافٍ مار خلال الحلقة الحديدية في دارة قطع التيار. ولأنّ التيار هو تيار متردد، فإنّه يتغيّر وينتج مجالًا مغناطيسيًّا متغيرًا في الحديد ممّا يولّد قوّةً دافعةً تأثيرية في الملّف الحسّاس الملفوف حول العروة الحديدية في دائرة قطع التيار. على سبيل المثال، إذا كان الجهاز يعمل على 8.0 A، ويمر خلال الشخص تيارًا مقداره 100 mA (= 0.1 A)، فإنّ 7.9 A سوف تظهر في السلك المتعادل. القوة الدافعة التأثيرية الناتجة في الملفّ الحسّاس من فرق 100-mA هذا سوف يضخم بواسطة دارة ترانزستور بسيطة ترسل إلى دارة ملفٍّ حلزونيٍّ قاطعة، فتؤدي إلى فتح الدارة بواسطة القاطع S. وفي حالة كون الجهاز الذي يحدث فيه الخطأ موصولا بالأرض، فإنّ فرق التيار يكون عندئذٍ عاليًا عندما يكون هنالك خطأ ما وتعمل دارة قطع التيار مباشرة.

ويمكن أن تكون دارة قطع التيار (GFCI) حساسة لتيارات أقلّ من 5 mA، وتتفاعل خلال 1m *sec* مما ينقذ أرواح الأفراد. وقد تكون ذا حجم صغير بحيث توضع داخل الجدران (الشكل 21-30) على شكل قابس كالذي يوصل به مجفف الشعر أو أداة تحميص الخبز. وبشكل خاص، من المهم أن توصل قواطع التيار في المطابخ، وغرف النوم، والحمامات، والخارج، وبالقرب من برك السباحة حيث يكون الناس أكثر تعرضًا لخطر ملامسة الأسلاك الكهربائية. تحتوي دارة قطع التيار دائمًا على مفتاح اختبار (للتأكد من عملها) ومفتاح إغلاق (بعد أن تعمل الدارة على قطع التيار).

الشكل 21-30
دارة قطع التيار على شكل قابس يوضع في الجدار وتميز بأنّ لها مفتاحي اختبار وإغلاق.



(أ)



(ب)

9-21 الحث *

الحث المتبادل*

الحث المتبادل

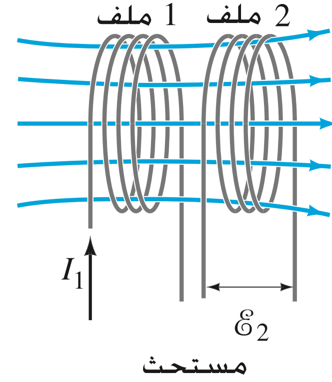
إذا وُضِعَ ملفّان بالقرب من بعضهما كما في (الشكل 21 - 31)، فإنّ تغيّر التيار في أحدهما سيولّد قوّة دافعة تأثيرية في الآخر. وعند تطبيق قانون فارادي على الملف الثاني، ستكون القوة الدافعة التأثيرية $\mathscr{E}_2$ المتولدة فيه تتناسب مع معدل تغير التدفق الذي يمر خلاله. ينتج التغيّرُ في التدفّق في الملفّ الثاني من تغيّرِ التيار في الملفّ الأول. لذا، تتناسب $\mathscr{E}_2$ مع معدل تغير التيار في الملفّ الأول

$$\mathscr{E}_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \qquad \text{(21- 8أ)}$$

حيث افترضنا أنّ الفترة الزمنية Δt صغيرة جدًّا. وثابت التناسب M يُسَمّى معامل الحثّ المتبادل (الإشارة السالبة بسبب قانون لنز). إنّ وحدة معامل الحث المتبادل هي $\Omega \cdot s = V \cdot s/A$. وتُسَمّى الهنري (H) نسبة إلى جوزيف هنري حيث $1\,H = 1\,\Omega \cdot s$.

معامل الحثّ المتبادل M هو ثابت لا يعتمد على التيار I_1، بل على الأبعاد الهندسية كالحجم، والشكل، وعدد اللفّات، والموقع النسبي لكلا الملفين، بالإضافة إلى أنّ الحديد (أو أيّ مادة فرومغناطيسية) موجود داخل الملفين أم لا. وعلى سبيل المثال، كلما كان الملفان في (الشكل 21-31) أبعد عن بعضهما بعضا ، قلت خطوط التدفق التي تمرّ خلال الملف الثاني، و كانت قيمة M أقلّ. إذا افترضنا الوضع المعاكس: تغير التيار في الملف الثاني يولد قوة دافعة تأثيرية في الملف الأول، فإنّ ثابت التناسب M تبقى له القيمة نفسها، وهنا تكون

$$\mathscr{E}_1 = -M\frac{\Delta I_2}{\Delta t} \qquad \text{(21- 8ب)}$$



الشكل 21-31 يولد تغيرُ التيار في أحد الملفين قوةً دافعة تأثيرية في الملف الثاني.

المحوّل هو أحد الأمثلة على الحث المتبادل الذي يكون فيه الترابط أكبر ما يمكن عندما تمرّ خطوط التدفق كلّها خلال الملفين تقريبًا. وهنالك تطبيق آخر للحثّ المتبادل. وهو بعض أنواع أجهزة تنظيم نبضات القلب التي تحافظ على تدفق الدم في قلب المصاب (البند 19-6) حيث تمر القدرة الكهربائية في ملف خارجي إلى ملفٍّ ثانٍ في الجهاز المثبت في القلب عن طريق الحث المتبادل. وهذا النوع ذو أفضلية على الأنواع الأخرى التي تستخدم البطاريات؛ لأنّ الجراحين لا يحتاجون إلى تبديل البطارية عند نفادها.

تطبيق الفيزياء
جهاز تنظيم نبضات القلب

الحثّ الذّاتيّ*

الحث الذاتي (القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في محث)

يُطَبَّقُ مبدأُ الحثّ أيضًا في حالة وجود ملفٍّ واحدٍ معزول. عندما يتغيّر التيار المار في الملفّ، فإنّ تغيّرًا في التدفّق ينتج داخله ، وهذا بدوره يولّد قوّةً دافعةً تأثيريّة، تعاكس التغير في التدفّق (قانون لنز)، وهي تشبه القوة الدافعة التأثيرية الراجعة المتولّدة في المحرك الكهربائي (على سبيل المثال، إذا ازداد التيار المار في الملف، فإنّ زيادة التدفق المغناطيسي تولّد قوّةً دافعةً تأثيريّةً تعاكس التيار الأصلي وتؤدي إلى تأخير زيادته). وتتناسب القوّة الدافعة التأثيريّة ε مع معدّل تغيّر التيّار (وتكون باتجاه يعاكس هذا التغير):

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad \text{(9 – 21)}$$

يُسَمّى ثابتُ التناسب L معاملَ الحثّ - للملف. ويقاس أيضًا بوحدة الهنري (H). ويعتمد مقدار L على حجم الملفّ وشكله. كما يعتمد على وجود قلب حديدي أو عدم وجوده.

إنّ الدارات المترددة $(ac\text{-}circuit)$ (البند 18-7) تحوي دائمًا بعض المحاثّ. ولكنها تكون عادة صغيرة إلى حدٍّ بعيد إلا إذا احتوت الدارة على ملف يتكون من عدة لفات. يُسَمّى الملفُ الذي يكون له معامل حثّ ذاتيّ L محثًّا. ويرمز إليه في مخططات الدارات الكهربائية بالرمز:

المحثات

—𝓂𝓂— [رمز المحث]

المثال المفاهيمي 13-21 اتجاه القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة في محثّ

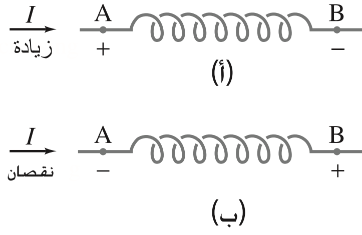
يمرّ التيار خلال الملفّ في (الشكل 21-32) من اليسار إلى اليمين.

(أ) إذا كان التيار يزداد مع الزمن. فبأيّ اتجاه تكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟

(ب) إذا كان التيار يقلّ مع الزمن. فبأيّ اتجاه تكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟

الجواب: (أ) نعلم من قانون لنز أنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة يجب أن تعاكس التغير في التدفق المغناطيسي. إذا ازداد التيار. فإنّ التدفق المغناطيسي سيزداد أيضًا. إنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة تؤثر بحيث تعاكس الزيادة في التدفق. مما يعني أنّها كمصدر للقوة الدافعة يعاكس المصدر الخارجي للقوة الدافعة التي تولد التيار. تؤثر القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف بحيث تعاكس التيار I في (الشكل 21-32 أ). وبكلمات أخرى. يمكن اعتبار المحثّ كبطارية يكون قطبها الموجب عند النقطة A في حين يكون قطبها السالب عند النقطة B.

(ب) من قانون لنز إذا تناقص التيار. فإنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة. والتي تزيد التدفق تعمل كمصدر للقوة الدافعة يدعم القوة الدافعة الخارجية. وتؤثر القوة الدافعة التأثيرية المتولدة لزيادة التيار I في (الشكل 21 - 32 ب). وفي هذا الوضع. تستطيع تخيل القوة الدافعة التأثيرية كبطارية يكون قطبها السالب عند النقطة A وقطبها الموجب عند B ليزداد مرور التيار إلى اليمين.



الشكل 21-32
الإشارتان الموجبة (+) والسالبة (-) تشيران للقوة الدافعة التأثيرية المتولدة بسبب تغير التيار كما لو كانت A و B قطبي بطارية والملف داخل هذه البطارية.

المثال 21-14 معامل الحثّ الذاتيّ للملف الحلزونيّ

حساب معامل الحث الذاتي لملف حلزوني

(أ) أوجد صيغة لمعامل الحثّ الذاتيّ L لملف حلزوني رفيع طوله l، ومساحة مقطعه A، ويحوي على عدد لفات مقداره N.

(ب) احسب معامل الحثّ الذاتيّ L لملف حلزونيّ إذا كانت $N = 100,\ l = 5.0\ \text{cm}$، $A = 0.30\ \text{cm}^2$. وقلب الملف من الهواء.

النّهج: يمكن إيجاد القوة الدافعة التأثيرية المتولدة من قانون فارادي ($\mathscr{E} = -N\,\Delta\Phi_B/\Delta t$). أو من خلال قانون الحثّ الذاتيّ ($\mathscr{E} = -L\ \Delta I/\Delta t$) وبمساواة هاتين الصيغتين. نستطيع إيجاد معامل الحث الذاتي L حيث نعلم كيفية حساب التدفق Φ_B خلال الملف الحلزوني باستخدام (المعادلة 20-8).

الحلّ: (أ) نساوي قانون فارادي (المعادلة 21-2 ب) مع معادلة الحث (المعادلة 21-9)

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ومن هذه المعادلة تكون قيمة L

$$L = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I}$$

نعلم أنّ $\Phi_B = BA$ (المعادلة 21-1). (والمعادلة 20-8) تعطينا المجال المغناطيسي B المتولد في الملف الحلزوني $B = \mu_0 NI/l$. ويكون التدفق المغناطيسي المتولد خلال الملف الحلزوني

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 NIA}{l}$$

وأيّ تغير في التيار ΔI يسبب تغيرًا في التدفق كما يلي:

$$\Delta\Phi_B = \frac{\mu_0 N\,\Delta I\,A}{l}$$

وبتعويض هذه في معادلتنا السابقة لحساب L نحصل على

$$L = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

(ب) باستخدام $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T}\cdot\text{m/A}$، وبتعويض القيم المعطاة نحصل على

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T}\cdot\text{m/A})(100)^2(3.0 \times 10^{-5}\ \text{m}^2)}{(5.0 \times 10^{-2}\ \text{m})} = 7.5\ \mu\text{H}$$

* 10-21 الطاقة المُختزنة في المجال المغناطيسيّ

رأينا في (البند 17-9) أنّ الطاقة المختزنة في مواسع تساوي $\frac{1}{2}CV^2$ وباستخدام طريقة مشابهة، يمكن إيجاد الطاقة U المختزنة في محثّ L يحمل تيارًا I:

$$U = \text{طاقة} = \frac{1}{2}LI^2$$

مثل الطاقة المختزنة في مواسع التي يمكن اعتبارها طاقة مختزنة في المجال الكهربائي بين اللوحين، يمكن أيضًا اعتبار أنّ الطاقةَ في المحثّ طاقةٌ مختزنة في مجاله المغناطيسي.

ولكتابة الطاقة بدلالة المجال المغناطيسي؛ نستطيع استخدام النتيجة التي حصلنا عليها في (المثال 21-14) وهي أنّ معامل الحثّ الذاتيّ لملف حلزوني $L = \mu_0 N^2 A/l$. والآن، فإنّ المجال المغناطيسي B في الملف يرتبط بالتيار حسب العلاقة (المعادلة 20-8) $B = \mu_0 NI/l$ أي أنَّ $I = Bl/\mu_0 N$، وتكون

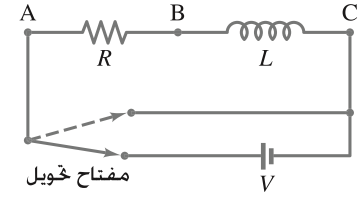
$$U = \text{طاقة} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\mu_0 N^2 A}{l}\right)\left(\frac{Bl}{\mu_0 N}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}Al$$

يمكن عدّ هذه الطاقة مختزنة في الحجم المحصور بين اللفات الذي يساوي Al. الطاقة المختزنة لوحدة الحجوم أو كثافة الطاقة تساوي

$$u = \text{كثافة الطاقة} = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad \textbf{(10-21)}$$

كثافة الطاقة في المجال المغناطيسي

ويمكن إثبات صلاحية هذه الصيغة، والتي اشتقت من خلال حالة خاصة للملف الحلزوني لأيّ حيِّز في الفضاء يوجد فيه مجال مغناطيسي. إذا وجدت مادة فرومّغناطيسية، فسنضع μ محل μ_0. هذا المعادلة تماثل المعادلة المشتقة في حالة المجال الكهربائي: $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ في (البند 17-9).



الشكل 21-33 دائرة محث ومقاومة (دائرة LR)

* 11-21 دارة المحث والمقاومة LR Circuit

يمتلك أيّ محثّ مقاومة كهربائية. ونمثّل هذا الوضع برسم مُحث L ومقاومة R بشكل منفصل عن بعضهما كما في (الشكل 21-33). يمكن أن تحوي المقاومة R مقاومة أخرى منفصلة موصولة على التوالي. والسؤال الآن هو: ماذا يحدث عند توصيل مصدر تيار ثابت (dc) مع هذه الدارة التي تتكون من محث ومقاومة؟ عند لحظة إغلاق الموصل مع البطارية، فإنّ التيار يبدأ بالمرور، ويعاكس بقوة دافعية تأثيرية في الملف بسبب تغيّر التيار. ومن جهة أخرى، فإنه عند مرور التيار، يتكون فرق جهد $(V = IR)$ حول المقاومة، وسيقلّ فرق الجهد حول المحث، وتكون هناك إعاقة أقلّ للتيار المار من المحث. يبدأ التيار بالازدياد تدريجيًّا كما هو موضح في (الشكل 21 - 34أ). ويصل إلى قيمة ثابتة $I_{max} = V/R$ عندما يكون الجهد كلّه حول المقاومة. شكل منحنى التيار كدالة في الزمن يعطي من خلاله العلاقة

$$I = \left(\frac{V}{R}\right)(1 - e^{-t/\tau})$$

حيث يُسَمّى e العددَ النيبري ... $e = 2.718$ (انظر البند 6-19). في حين تُسَمّى $\tau = L/R$ الثابتَ الزمني للدارة. عندما يكون $t = \tau$، فإنّ $(1 - e^{-1}) = 0.63$. ولهذا، فإنّ τ هو الزمن اللازم لوصول التيار إلى $0.63I_{max}$.

إذا أزيلت البطارية فجأة من الدارة (توصيل الدائرة بالخطوط المقطعة في (الشكل 21-33). فإنّ التيار يتناقص كما في (الشكل 21-34 ب). هذا هو منحنى انحلال أسّيّ ويعطى من خلاله العلاقة

$$I = I_{max}\,e^{-t/\tau} \qquad [\text{دارة } LR \text{ بغياب قوة دافعة}]$$

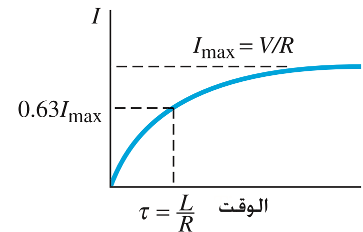
الثابت الزمني τ هو الزمن اللازم حتى يقلّ التيار إلى 37 % من قيمته الأصلية، ويساوي L/R.

ترينا هذه المنحنيات أنّ هنالك زمنا تفاعليّا عند فتح مغناطيس كهربائي أو غلقه . ونستطيع أن نرى أيضًا أنّ الدارة التي تتكون من محثّ ومقاومة تشبه الدارة التي تتكون من مواسع ومقاومة RC (البند 19-6). وعلى العكس من دارة المكثف، فإنّ الثابت الزمني هنا يتناسب عكسيًّا مع المقاومة R.

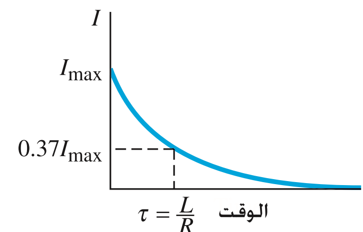
الشكل 21-34

(أ) نمو التيار في دارة المحث والمقاومة عند وصله ببطارية.

(ب) انحلال التيار عند فصل دارة المحث والمقاومة عن البطارية.



(أ)



(ب)

المثال 15-21 الثّابت الزّمنيّ للملفّ الحلزونيّ

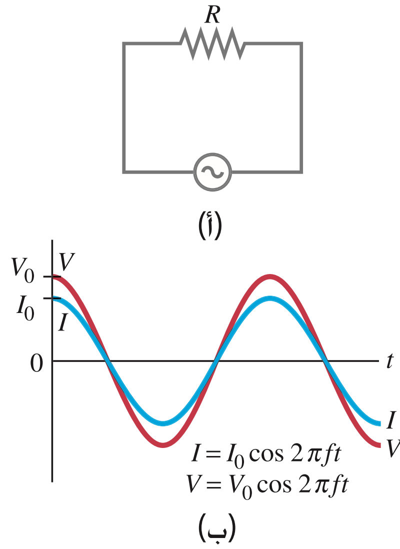
معامل حثّه الذاتيّ 87.5 mH، ملف حلزونيّ ومقاومته $0.250\ \Omega$. أوجد: (أ) الثابت الزمني لهذه الدارة . (ب) ما الوقت اللازم لوصول التيار من الصفر إلى 63% من قيمته النهائية (العظمى) عندما يوصل ببطارية فرق جهدها V؟

النّهج: الثابت الزمني هو $\tau = L/R$. ثم نستخدم المعادلة التي تعطينا التيار، ونعوّض $I = 0.63 I_{max}$ ونحلّ لإيجاد الزمن.

الحلّ: (أ) من التعريف $\tau = L/R = (87.5 \times 10^{-3}\ \text{H})/(0.250\ \Omega) = 0.350\ \text{s}$

(ب) رأينا سابقًا أنّ $I = (V/R)(1 - e^{-t/\tau})$. ونريد أن نجد t بحيث يكون $I = (0.63)(V/R)$ حيث $V/R = I_{\max}$، وهذا يحدث عندما يكون $t = \tau = L/R$. وعليه، يكون $t = 0.350\ \text{s}$

12-21 دارات التيّار المتردّد (AC) والمفاعلة



الشكل 35-21

(أ) مقاومة موصولة مع مصدر متردد.

(ب) التيار (المنحنى الأزرق) والجهد (الأحمر) حول المقاومة لهما الطور نفسه.

في المقاومة: التيار والجهد يكونان بنفس الحوار

ناقشنا سابقًا الدارات التي تحتوي على مقاومة، ومواسع، ومحثّ عندما تكون متصلة بمصدر مستمر (dc) للقوة الدافعة، أو دون مصدر (كما في تفريغ المكثف في الدارة التي تتكون من مقاومة ومواسع). والآن، سنناقش توصيل هذه العناصر في دارة تتصل بمصدر متردد لفرق الجهد الذي يعطي تيارًا مترددًا (ac).

في البداية، سنختبر كيفية تصرّف كلّ عنصر عند توصيله على انفراد مع مصدر الجهد المتردد الذي يرمز إليه بالرمز

 [جهد متردد]

وينتج موجة جيبيّة ترددها f. وسنفترض في الحالات جميعها أنّ القوة الدافعة التأثيرية تعطي تيارًا

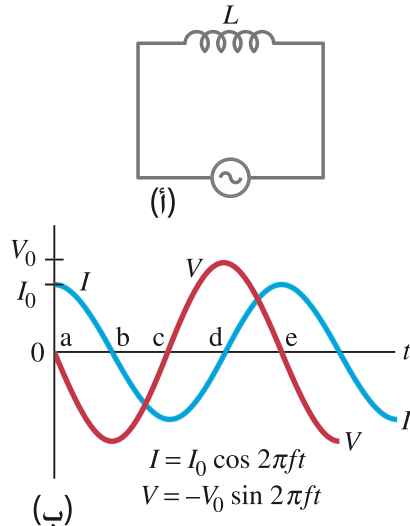
$$I = I_0 \cos 2\pi f t$$

حيث t الزمن، و I_0 تيار الذروة. تذكر (البند 7-18) أنّ $V_{\text{rms}} = V_0/\sqrt{2}$، وأنّ $I_{\text{rms}} = I_0/\sqrt{2}$ (معادلة 8-18).

المقاومة

عندما يوصل مصدر متردد مع مقاومة كما في (الشكل 35-21أ)، يزداد التيار وينقص مع القوة الدافعة المترددة حسب قانون أوم، $I = V/R$. ويرينا (الشكل 35-21ب) الجهد (المنحنى الأحمر) والتيار (المنحنى الأزرق). ولأنّ التيار صفر عندما يكون الجهد صفرًا، فإنّ التيار يصل الذروة عندما يكون الجهد كذلك. ونقول إنّ التيار والجهد لهما الطور نفسه (*in Phase*). تتحول الطاقة إلى حرارة (البند 7-18) بمعدل $\overline{P} = \overline{IV} = I_{\text{rms}}^2 R = V_{\text{rms}}^2/R$

المحث



الشكل 36-21

(أ)محث موصول مع مصدر جهده متردد

(ب)التيار (المنحنى الأزرق) يتخلف عن الجهد (المنحنى الأحمر) بربع دورة أو 90°.

المحث: الجهد يسبق التيار

يرينا (الشكل 36-21أ) محثًّا معامل حثّه الذاتيّ L (—ᥫᥫᥫ—) موصولًا مع مصدر متردد. نهمل مقاومة المحث (التي تكون في العادة صغيرة جدًّا) يساوي الجهدُ المطبق على المحث القوة الدافعة التأثيرية المعاكسة المتولدة فيه بسبب تغير التيار كما تعطى من (المعادلة 21-9). وبسبب أنّ مجموع القوى الدافعة (الجهود) لأيّ دارة مغلقة يجب أن يكون صفرًا كما تخبرنا قاعدة كيرشوف. فإن

$$V - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0 \text{ أو } V = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

حيث V هي جهد المصدر المتغير بشكل جيبي، و $L\ \Delta I/\Delta t$ هي الجهد التأثيري المتولد في المحث. واستنادًا إلى هذه المعادلة، فإنّ التيار I سوف يزداد بسرعة أكبر عندما تأخذ V قيمتها القصوى، $V = -V_0$، أمّا I فستقلّ بسرعة أكبر عندما $V = -V_0$. هاتان اللحظتان تعودان للنقطتين d، و b على المنحنى المرسوم للجهد مع الزمن في (الشكل 21-36 ب). لاحظ أنّ التيار يجتاز قيمته القصوى بعد ربع دورة من اجتياز الجهد لقيمته القصوى. وهنا نقول إنّ التيار يتخلف عن الجهد في المحث بمقدار 90° . ولأنّ التيار والجهد في المحث مختلفان في الطور بزاوية 90°، فإنّ ناتج IV الذي يساوي القدرة، يكون موجبًا أو يكون سالبًا بالتساوي، أي لا تتبدد طاقة على شكل طاقة حرارية.

وكما تعيق المقاومة تدفق الشحنات، فإنّ الحث يعيق تدفق الشحنات أيضًا في حالة التيار المتردد بسبب القوة الدافعة التأثيرية المعاكسة المتولدة. لمقاومة R، يرتبط كلّ من التيار والجهد بالعلاقة $V=IR$. ونستطيع أن نكتب معادلة مشابهة للمحث كما يلي:

$$V = IX_L$$ [قيم rms او القصوى وليست لحظية] **(21-11أ)**

المفاعلة

حيث X_L تُسَمّى المفاعلة الحثيّة (**inductive reactance**). ولها وحدات المقاومة (**units of ohms**). الكميات V و I في (المعادلة 21-11أ) يمكن أن تكون جذر متوسط المربعات rms للاثنتين، أو قيمة الذروة لهما (انظر البند 18-7). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هذه المعادلة يمكن أن تربط قيم الذروة مع بعضها بعضا. إنّ قيمة الذروة لكلّ من التيار والجهد لا تكونان عند اللحظة نفسها. لذا، فإنّ (المعادلة 21 – 11أ) لا تصلح للتطبيق عند لحظة معينة كما هي الحال بالنسبة إلى المقاومة ($V=IR$). وباستخدام بعض الاشتقاقات الرياضية (وأيضًا نتيجة لبعض التجارب) يمكن إثبات أنّ

المفاعلة الحثية

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$ **(21-11ب)**

حيث $\omega = 2\pi f$ و f هو تردد المصدر المتردد

المثال 21-16 مفاعلة ملف

ملف مقاومته $R = 1.00\ \Omega$، ومعامل حثه الذاتي 0.300 H. احسب التيار في الملف عند: (أ) تطبيق فرق جهد مستمر (dc) مقداره 120-V. (ب) تطبيق فرق جهد متردد (ac) له 120-V ac (rms) عند تردد مقداره 60.0 Hz.

النّهج: عندما يكون الجهد مستمرًا، لا تكون هنا مفاعلة حثية ($X_L = 2\pi fL = 0$ حيث $f = 0$). لذلك سنطبق قانون أوم على المقاومة. وعندما يكون التيار مترددًا، نحسب المفاعلة X_L، ثم نستخدم (المعادلة 21-11أ)

الحلّ: (أ) بوجود فرق جهد مستمر لا يكون لدينا X_L. وببساطة نطبق قانون أوم

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\ \text{V}}{1.00\ \Omega} = 120\ \text{A}$$

(ب)المفاعلة الحثية تساوي

$$X_L = 2\pi f L = (6.28)(60.0\ \text{s}^{-1})(0.300\ \text{H}) = 113\ \Omega$$

وبالتالي، يمكن إهمال قيمة المقاومة مقارنة بهذه القيمة، لذلك

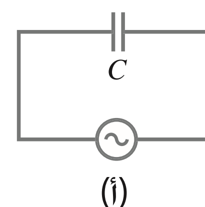
$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_L} = \frac{120\ \text{V}}{113\ \Omega} = 1.06\ \text{A}$$

ملحوظة: يمكن القول هنا إنّ الممانعة الكلية هي $114\ \Omega = 1\ \Omega + 113\ \Omega$، وهذا يعني أنّ حوالي 1% من الجهد يكون حول المقاومة، أو حوالي 1 V، وحول الحث يكون 119 V. الـ 1 V حول المقاومة صحيحًا، فإنّ بقية الجمل لا تكون صحيحة بسبب تفاوت الطور في الحث. وهذا ما سنناقشه في البند القادم.

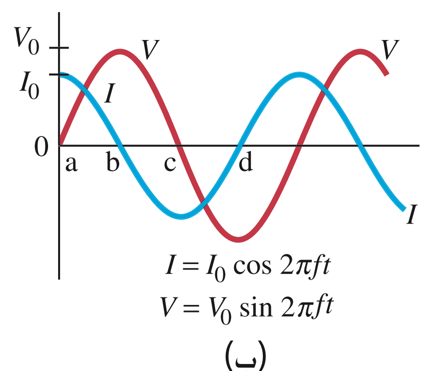
*(المكثف)

عندما يوصل مواسع ببطارية، فإنّ لوحي المكثف – وبسرعة- سوف يمتلكان شحنتين متساويتين ومتعاكستين في الإشارة، دون مرور تيار في الدارة. إنّ المكثف يمنع مرور التيار المستمر. ولكن عند وصله بمصدر جهد متردد كما في (الشكل 21-37أ)، فإنّ تيارًا سيمر بشكل مستمر. ويمكن أن يحدث هذا؛ لأنه عند تطبيق فرق الجهد المتردد، تبدأ الشحنات بالتدفق على أحد اللوحين فتكسبه شحنة سالبة، في حين تكسب الآخر شحنة موجبة. ولكن عندما يعكس الجهد نفسه، تتدفق الشحنات بالاتجاه المعاكس. لذا، عند تطبيق جهد متردد، فإنّ تيارًا مترددًا سوف يظهر في الدارة بشكل مستمر.
الجهد المطبق يجب أن يساوي الجهد حول المكثف: $V = Q/C$، حيث C هي السعة، و Q هي الشحنة على اللوحين. لذا، فإنّ الشحنة على اللوحين تتبع الجهد. ولكن ماذا عن التيار؟ عند النقطة a في (الشكل 21-37 ب). وعندما يكون الجهد صفرًا ويبدأ بالازدياد، فإنّ الشحنة على اللوحين تكون صفرًا أيضًا. وعندما يصل الجهد قيمته القصوى V_0 (عند النقطة b)، فإنّ الشحنات المتجمعة على اللوحين تؤدي إلى منع شحنات أخرى من السريان، ويقلّ التيار إلى الصفر عند النقطة b. ويتبع التيار المنحنى الأزرق في (الشكل 21-37 ب).

الشكل 21-37
(أ) مواسع موصول مع مصدر متردد.
(ب) تيار متردد يسبق الجهد بربع دورة أو 90°.



(أ)



(ب)

المكثف: التيار يسبق الجهد.

كما في المحثّ، فإن الجهد والتيار يكون بينهما فرق في الطور مقداره $90°$. ولكن في حالة المكثّف فإنّ التيار يصل قيمته القصوى قبل ربع دورة من وصول الجهد قيمته القصوى. ولذلك، نقول إنّ التيار يسبق الجهد بـ $90°$ في حالة المكثف.

R فقط (وليس C أو L) هي التي تبدد طاقة.

وبسبب الاختلاف في الطور بين التيار وفرق الجهد، فإنّ معدّل الطاقة المبددة يساوي صفرًا كما هو الحال في المحث. لذا، فإنّ المقاومة فقط هي التي تبدد طاقة على شكل حرارة في دارة التيار المتردد. العلاقة بين الجهد المطبق والتيار في المكثف يمكن كتابتها كما في حالة المحث كما يلي:

[لقيم جذور متوسط المربعات أو الذروة]

$$V = IX_C \qquad \textbf{(12 - 21أ)}$$

حيث X_C المفاعلة السعوية (*capacitance reactance*) ولها وحدات المقاومة (ohms). فرق الجهد V والتيار I يمكن أن يكون كلاهما جذور متوسط المربعات (rms). أو كلاهما قيمة الذروة (I_o و V_o)؛ يعتمد X_C على كلّ من السعة C والتردد f كما يلي:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad \textbf{(12 - 21ب)}$$

حيث $\omega = 2\pi f$. وفي حالة المصدر المستمر، تكون $f = 0$، و X_C تصبح قيمة لا نهائية كما يجب أن تكون لأنّ المكثف لا يمرر تيارًا مستمرًا.

المثال 21-17 المفاعلة السّعويّة

ما هو تيار جذر متوسط المربعات V_{rms} في الدارة الموضحة في (الشكل 21-37أ) إذا كانت $C = 1.0\,\mu F$، $V_{rms} = 120\text{ V}$، وإذا كان (أ) $f = 60\text{ Hz}$. (ب) $f = 6.0 \times 10^5\text{ Hz}$.

النّهج: نجد المفاعلة باستخدام (المعادلة 21-12 ب)، ثم نحلّ لإيجاد التيار من الصيغة المكافئة لقانون أوم (المعادلة 21-12أ).

المفاعلة السعوية

الحل: (أ) $X_C = 1/2\pi f C = 1/(6.28)(60\text{ s}^{-1})(1.0 \times 10^{-6}\text{ F}) = 2.7\text{ k}\Omega$

جذر متوسط المربعات للتيار هو (معادلة 21-12أ):

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_C} = \frac{120\text{ V}}{2.7 \times 10^3\ \Omega} = 44\text{ mA}$$

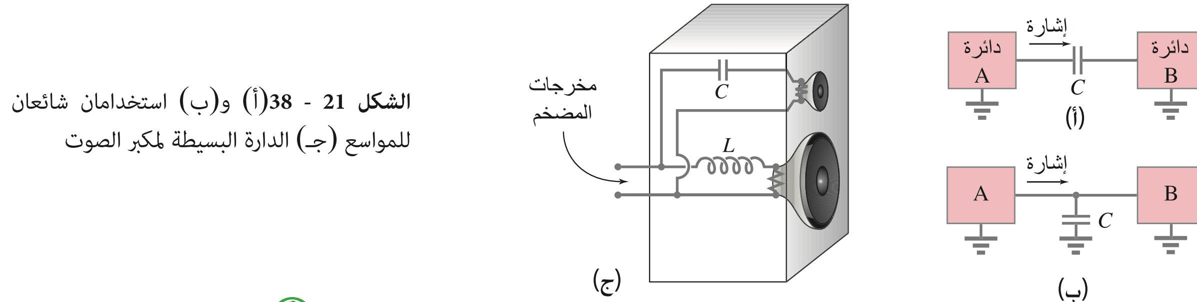
(ب) عندما يكون $f = 6.0 \times 10^5\text{ Hz},\ X_C$ سوف تكون $X_C = 0.27\ \Omega$، و $I_{rms} = 440\text{ A}$. وهذه القيمة أكبر من الأولى.

ملحوظة: إنّ الاعتماد على التردد f مثير؛ فعندما يكون التردد كبيرًا، تكون المفاعلة السعوية صغيرة جدًا.

هنالك تطبيقان شائعان للمواسعات موضّحان في (الشكل 21-38أ و ب). ففي (الشكل 21-38أ)، يمكن القول إنّ الدارة A من ناحية السعة مماثلة للدارة B. الهدف من المكثف هو إعاقة مرور التيار المستمر (dc) من A إلى B. ولكنه يسمح بمرور إشارة تيار متردد (ac). أما في (الشكل 21-38ب)، فإنّ المكثف أيضًا يمرر ac ولكنه لايمرّر dc. في هذه الحالة، فإنّ فرق جهد مستمر يمكن تطبيقه بين الدارتين A و B. ولكن الإشارة المترددة تترك A وتمر باتجاه الأرض بدلا من المرور إلى الدارة B.

تطبيق الفيزياء
المكثّفات تستخدم كمرشحات

وهكذا فإن المكثف في (الشكل 21 - 38ب) يعمل كمرشح عندما يكون الجهد المستمر مطلوبًا؛ أي تغيّر حاد في الجهد سوف

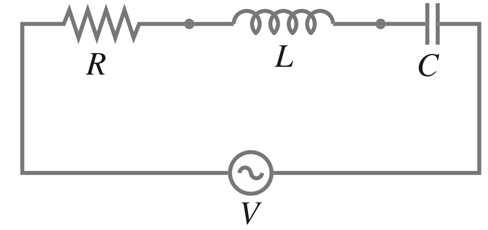


الشكل 21 - 38(أ) و(ب) استخدامان شائعان للمواسع (جـ) الدارة البسيطة لمكبر الصوت

تطبيق الفيزياء
طريقة توصيل السماعات

مكبرات الصوت لها سماعتان منفصلتان؛ إحداهما تعمل على تردد منخفض، في حين تعمل الأخرى على تردد مرتفع. وتحتوي على وصلة تحويل تتكون من مكثف في دارة التردد العالي لمنع الإشارات منخفضة التردد، وكذلك على محثّ في دارة التردد المنخفض لمنع الإشارات عالية التردد. $X_L = 2\pi f L$. وعليه، فإنّ الأصوات ذات الترددات المنخفضة تمر من خلال السماعة التي تعمل على هذه الترددات. انظر (الشكل 21-38 جـ).

* 13-21 دارة تيّار متردّد تتكوّن من محثّ، ومقاومة، ومواسع على التوالي



الشكل 21-39 دارة محث ومقاومة ومواسع (LRC)

لنختبر الآن دارة تحتوي العناصر الثلاثة معًا على التوالي وهي: مقاومة R، ومحث L، ومواسع C. (الشكل 21 - 39) إذا كان لدينا دارة تحتوي على عنصرين فقط، فإنّنا نستطيع استخدام نتائج هذا الجزء بوضع $R = 0$، أو $X_L = 0$، أو $X_C = 0$ حسب الحاجة. و إذا كان V_R، و V_L، و V_C تمثل فرق الجهد حول كلّ عنصر عند لحظة معينة من الزمن، و V_{R0}، و V_{L0} و V_{C0} تمثل القيمة القصوى (قيمة الذروة) لهذه الجهود. فإنّ الجهد حول كلّ عنصر سوف يتبع علاقات الطور التي ناقشناها في البند السابق. وعند أيّ لحظة، فإنّ الجهد V الذي يعطى من المصدر سوف يكون باستخدام قانون كيرتشوف الثاني (قانون العروة)

$$V = V_R + V_L + V_C \qquad \textbf{(13-21)}$$

ولأنّ الجهود المختلفة ليست مُتَّفِقَةً في الطور فإنّها لن تصل جميعها لقيمة الذروة في الوقت نفسه. وقيمة الذروة لجهد المصدر V_0 لن تساوي $V_{R0} + V_{L0} + V_{C0}$

تنويه !

لا نستطيع إضافة جهود الذروة لإيجاد جهد المصدر

مخططات المطوار

لنختبر الآن دارة LRC بالتفصيل. التيار عند أيّ لحظة يجب أن يكون متساويًا عند أيّ نقطة في الدارة. لذا، فإنّ التيار للعناصر كلّها يكون متفقًا بالطور، في حين لا يكون الجهد كذلك. نختار نقطة البداية عند $(t = 0)$، حيث يكون التيار عند أيّ لحظة يساوي

$$I = I_0 \cos 2\pi f t$$

نحلل دارة LRC باستخدام **مخططات المطوار**. ونرسم أسهمًا (مثل المتجهات) في المستوى xy لتمثيل كلّ جهد. بحيث يمثل طول كلّ سهم مقدار جهد الذروة حول كلّ عنصر

$$V_{R0} = I_0 R, \qquad V_{L0} = I_0 X_L\,, \; V_{C0} = I_0 X_C$$

V_{R0} تكون متفقة بالطور مع التيار، ويرسم بداية $(t = 0)$ باتجاه محور السّينات الموجب، وكذلك الحال بالنسبة إلى التيار. يسبق V_{L0} التيار بزاوية $90°$، ويسبق V_{R0} بزاوية $90°$ أيضًا، ويرسم بداية باتجاه محور الصّادات الموجب. يتخلف V_{C0} عن التيار بزاوية $90°$، و V_{C0} يرسم بداية محور الصّادات السالب. انظر (الشكل 21-40أ). إذا تركنا مخطّط المتجهات يدور عكس اتجاه عقارب الساعة بتردد مقداره f فإننا نحصل على المخطّط الموضّح في (الشكل 21-40 ب): بعد زمن t، يدور كلّ سهم بزاوية مقدارها $2\pi f t$، ومسقط كلّ سهم على محور السّينات يمثل فرق الجهد حول كلّ عنصر عند اللحظة t (الشكل 21-40جـ). على سبيل المثال

$$I = I_0 \cos 2\pi f t.$$

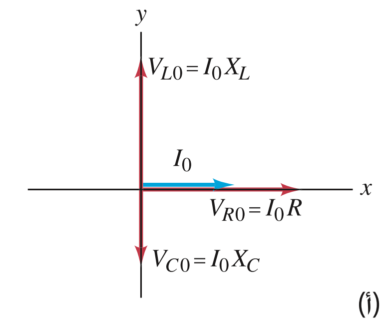
إنّ مجموع مساقط متجهات الجهد الثلاثة تمثل الجهد اللحظي حول الدارة الكلية (V). لذلك، فإنّ الجمع المتجه لهذه المتجهات سوف يكون المتجه الذي يمثل جهد الذروة للمصدر (V_0) كما هو موضح في الشكل (21-41)، حيث نرى أنّ V_0 يصنع زاوية ϕ مع I_0 و V_{R0}. وبمرور الزمن، فإنّ V_0 تدور مع المتجهات الأخرى بحيث يصبح الجهد اللحظي V (مسقط V_0 على محور السّينات) مساويًا لـ (انظر الشكل 21-41):

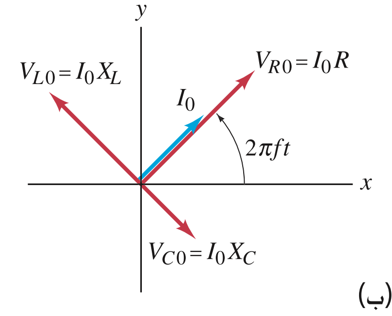
$$V = V_0 \cos(2\pi f t + \phi)$$

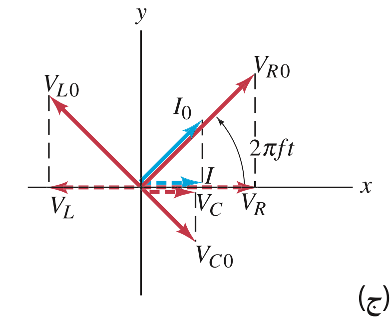
ومن المؤكد أنّ فرق الجهد V حول عناصر الدارة ككل يجب أن يساوي جهد المصدر (الشكل 21-39). لذلك، فإنّ الجهد من المصدر يختلف في الطور مع التيار بزاوية ϕ.

ومن التحليلات السابقة، يمكن الآن إيجاد الممانعة الكلية للدارة Z وتعريفها من العلاقة $V_0 = I_0 Z$، أو $V_{rms} = I_{rms} Z$.

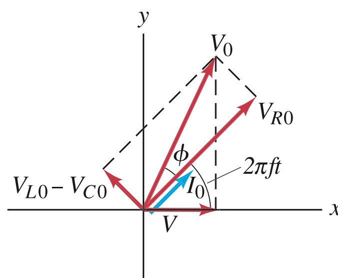
من (الشكل 21 - 41) باستخدام نظرية المضلع في المتجهات (V_0 هو وتر المثلث قائم الزاوية)







الشكل 21-40 مخططات المطوار لدارة LRC



الشكل 21-41 مخطط المطوار لدارة LRC ترينا حاصل الجمع الاتجاهي لـ V_0

مقاومة

نرى أنّ

$$V_0 = \sqrt{V_{R0}^2 + (V_{L0} - V_{C0})^2}$$
$$= I_0\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

ومن (المعادلة 21-14) فإنّ الممانعة الكلية Z هي

المعانعة الكلية

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \textbf{(15-21)}$$

ومن خلال (الشكل 21-14) نستطيع أيضًا إيجاد زاوية الطور Ø بين الجهد والتيار كما يلي:

$$\tan\phi = \frac{V_{L0} - V_{C0}}{V_{R0}} = \frac{I_0(X_L - X_C)}{I_0 R} = \frac{X_L - X_C}{R} \qquad \textbf{(16-21أ)}$$

و

$$\cos\phi = \frac{V_{R0}}{V_0} = \frac{I_0 R}{I_0 Z} = \frac{R}{Z} \qquad \textbf{(16-21ب)}$$

(الشكل 21-41) رسم في حالة $X_L > X_C$. ولهذا، فإنّ التيار يتخلف عن جهد المصدر بزاوية ϕ. عندما يكون العكس صحيحًا $(X_L < X_C)$. فإنّ ϕ في المعادلة 21-16 تكون أقلّ من الصفر. والتيار يسبق جهد المصدر.

رأينا سابقًا أنّ القدرة تستنفد فقط في المقاومة. ولا يستنفد أيّ شيء في المحثّ أو المكثّف. ولذلك. يكون متوسط القدرة $\overline{P} = I_{rms}^2 R$ ولكن من (العلاقة 21-16 ب) $R = Z\cos\phi$. ولذلك تكون:

معامل القدرة

$$\overline{P} = I_{rms}^2 Z\cos\phi = I_{rms} V_{rms}\cos\phi \qquad \textbf{(17-21)}$$

المعامل $\cos\phi$ يُسَمّى معامل القدرة للدارة.

المثال 21-18 دائرة LRC (محث، ومقاومة، ومواسع)

في (الشكل 21-39). افرض أنّ $R = 25.0\ \Omega$، $L = 30.0\ \text{mH}$، و $C = 12.0\ \mu\text{F}$ وموصولة بمصدر جهد متردد مقداره 90.0-V (V_{rms}). وتردده 500-Hz. احسب: (أ) التيار في الدارة. (ب) قراءة الفولتميتر (rms) حول كلّ عنصر.

النّهج: لإيجاد التيار: نحتاج إلى إيجاد الممانعة (المعادلات 21-15، 21-11ب، 21-12ب) ثم نستخدم $I_{rms} = V_{rms}/Z$. ويمكن إيجاد فرق الجهد حول كلّ عنصر من قانون أوم والصيغ المكافئة له: $V_R = IR, V_L = IX_L$ و $V_C = IX_C$

الحلّ: (أ) في البداية. نجد المفاعلة لكلٍّ من المحثّ والمكثّف عند $f = 500\ \text{Hz} = 500\ \text{s}^{-1}$

$$X_L = 2\pi f L = 94.2\ \Omega, \qquad X_C = \frac{1}{2\pi f C} = 26.5\ \Omega$$

ومن هنا. فإنّ الممانعة الكلية تساوي

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(25.0\ \Omega)^2 + (94.2\ \Omega - 26.5\ \Omega)^2} = 72.2\ \Omega$$

ومن نسخة الممانعة لقانون أوم، (المعادلة 21 - 14) نجد أنّ

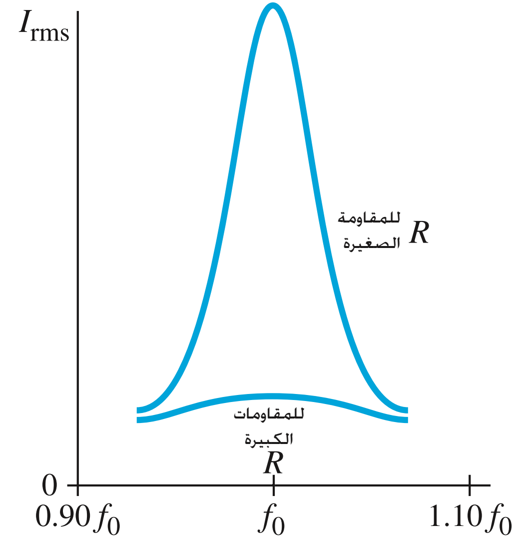
$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{90.0\ \text{V}}{72.2\ \Omega} = 1.25\ \text{A}$$

(ب)جهد متوسط المربعات $(rm\ s)$ لكلّ عنصر هو

$$(V_R)_{rms} = I_{rms} R = (1.25\ \text{A})(25.0\ \Omega) = 31.2\ \text{V}$$
$$(V_L)_{rms} = I_{rms} X_L = (1.25\ \text{A})(94.2\ \Omega) = 118\ \text{V}$$
$$(V_C)_{rms} = I_{rms} X_C = (1.25\ \text{A})(26.5\ \Omega) = 33.1\ \text{V}$$

ملحوظة: لا تجمع هذه الجهود مع بعضها بعضًا لتساوي جهد المصدر، 90.0 V (rms). في الواقع، فإنّ $(V_L)_{rms}$ يتجاوز جهد المصدر، ويمكن أن يحدث هذا لأنّ الجهود المختلفة تكون مختلفة في أطوارها. وعند أيّ لحظة، يمكن أن يكون أحد الجهود سالبًا لتعويض الجهد الموجب الكبير للجهدين الآخرين. إنّ جهد متوسط المربعات rms يكون من التعريف موجبًا دائمًا. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّه يجب عدم جمع جهود متوسط المربعات للحصول على جهد المصدر، بل يجب جمع الجهد اللحظي للعناصر كلّها عند زمن معين للحصول على جهد المصدر عند تلك اللحظة.

* 14-21 الرنين في دارات التيّار المتردّد



الشكل 21-42

التيار في دارة LRC كدالة في التردد ترينا أقصى قيمة لمنحنى الرنين عند $f = f_0 = (1/2\pi)\sqrt{1/LC}$ تردد الرنين

تُعطى قيمة جذر متوسط المربعات للتيار في دارة الحث والمتسع والمقاومة الموصولة على التوالي كما يلي: (انظر المعادلات 21-14، و21-15، و21-11ب، و21-12ب):

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \dfrac{1}{2\pi f C}\right)^2}} \tag{18 – 21}$$

وبسبب أنّ المفاعلة لكلٍّ من الملفّ والمتسع تعتمد على تردد المصدر f فإنّ التيار في دارة LRC يعتمد على التردد. من (المعادلة21-18) نرى أنّ القيمة القصوى للتيار تكون عندما يحقق التردد العلاقة التالية:

$$2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} = 0$$

وبحلّ هذه المعادلة للحصول على f فإنّنا ندعو الحلّ f_0 كما يلي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{19 – 21}$$

وعندما $f = f_0$ فإنّ الدارة تكون في حالة رنين، و f_0 يُسَمّى تردّد الرنين للدائرة. عند هذا التردّد، تكون $X_C = X_L$، وتكون الممانعة معتمدة على المقاومة فقط. الشكل الذي يمثل I_{rms} كدالة في التردد f موضح في (الشكل 21 – 42) لقيم محددة لكلّ من R، و L، و C. إذا كانت R صغيرة مقارنة بكلّ من X_L، و X_C، فإنّ منحنى الرنين يكون أعلى وأرفع. وعندما تكون R صغيرة جدًّا، فإننا نتكلم عن دارة LCالطاقة في دارة LC تتذبذب بتردد f_0 بين الحث والمكثف مع ضياع جزء قليل جدًّا منها في المقاومة R (بعض المقاومات لا يمكن تجنبها). ويُسَمّى هذا تذبذب المتسع والحث، أو تذبذبا كهرومغناطيسيًّا. ليست الشحنة فقط هي التي تتذبذب ذهابًا وإيابًا، ولكن الطاقة أيضًا تتذبذب بحيث تختزن تارةً في المجال الكهربائي للمتسع، وتارةً أخرى في المجال المغناطيسي للمحث.

يُستخدم الرنين الكهربائي في كثيرٍ من الدارات الكهربائيّة: ففي المذياع والتلفزيون تُستخدم دارات الرنين لتحديد موقع محطّة البثّ وتردّدها. عدّة تردّدات تصل دارة الهوائي، ولكنّ تيّارًا محددًا يمرّ فقط عند الترددات التي تكون قريبةً من تردّد الرنين. وكلّ من L، و C متغيّران بحيث نستطيع استقبال أكثر من محطّة. (المزيد عن الموضوع سيناقش في الفصل 22).

ملخّص

يساوي التدفقُ المغناطيسيُّ المارُّ خلالَ عروةٍ حاصلَ ضربِ مساحةِ العروةِ في المركبةِ العموديّةِ للمجالِ المغناطيسيّ

$$\Phi_B = B_\perp A = BA\cos\theta \tag{1 – 21}$$

إذا تغيّر التدفق المغناطيسيّ خلال ملف مع الزمن، فستتولّد قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ في الملفّ. ويساوي مقدارُ القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة المعدّلَ الزمنيّ لتغيّر التدفق المغناطيسيّ خلال الملفّ مضروبًا في عدد لفّات الملفّ N

$$\mathcal{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \tag{2ب – 21}$$

وهذا هو قانون فارادي في الحث.

تنتج القوة الدافعة التأثيرية تيّارًا، بحيث يكون مجالُهُ المغناطيسيُّ معاكسًا للتغيّر الأصليّ في التدفّق المغناطيسيّ **(قانون لنز).**

يشير قانون فارادي أيضًا إلى أنّ تغيّر المجال المغناطيسيّ ينتج مجالًا كهربائيًّا، والسلك المستقيم الذي طوله l ويتحرّك بسرعة v عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدّته B تتولّد بين نهايتيه قوّة دافعة تأثيريّة تساوي

$$\mathcal{E} = Blv \tag{3 - 21}$$

يحوِّل المولّدُ الكهربائيّ الطاقةَ الميكانيكيّة إلى طاقةٍ كهربائيّة. ويستند عمله إلى قانون فارادي: عند دوران ملفٍّ بفعلٍ ميكانيكيٍّ بانتظام خلال مجالٍ مغناطيسي، فإنّ تغيّرَ التدفّق خلال الملفّ سينتج تيّارًا تأثيريًّا جيبيًّا، وهو ما نستفيده من المولّد الكهربائي.

[* المحرّكُ الكهربائيُّ الذي يعمل بعكس المولّد يؤثّر كالمولّد من حيث إنتاجُ قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ راجعةٍ أو عكسيّة، والتي تنتج في ملفّه الدوّار. ولأنّ هذه القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تؤثّر عكس الفولتيّة الداخلة، فإنّها تؤدّي إلى تقليل التيار المار في ملفّ المحرك. وبالكيفية نفسها فإنّ المولد يؤثر كالمحرك من حيث وجود عزم معاكس يؤثر في دوران الملف].

المحوِّلُ الكهربائيُّ هو أداةٌ تُستخدم لتغيير قيمة فرق الجهد المتردّد (ac). ويتكون من ملفٍّ ابتدائيٍّ وآخر ثانوي. إنّ التغيّر في التدفق الناتج من جهد متردد في الملف الابتدائي يولد جهدًا تأثيريًّا مترددًا في الملفّ الثانوي. في الملفّ الذي تكون كفاءته 100%، فإنّ نسبة الجهد الخارج إلى الجهد الداخل (V_S/V_P) تساوي نسبة عدد لفات الملفّ الثانوي N_S إلى عدد لفّاتِ الملفّ الابتدائيّ N_P كما يلي:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \tag{6 - 21}$$

نسبة تيّار الملفّ الثانويّ إلى تيّارِ الملفّ الابتدائيّ تساوي عكس نسبة عدد اللفات كما يلي:

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \tag{7 – 21}$$

هناك بعض التطبيقات على الحثّ المغناطيسيّ مثل: الميكروفونات، ودارات قطع التيّار، وأجهزة الرصد الزلزالي، ورؤوس التسجيل والقراءة في الحاسوب، وأشرطة التسجيل الصوتيّة والمرئيّة.

[* التيار المتغيّر في الملفّ سوف ينتج تغيّرًا في المجال المغناطيسي، ممّا يؤدّي إلى توليد قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ في ملفٍّ ثانٍ يقع بالقرب منه. معامل الحثّ المتبادل M يعرّف من العلاقة:

$$\mathscr{E}_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \qquad (8 - 21)$$

[* في الملفّ المنفرد، ينتج تغيّر B نتيجة تغيّر التيّار قوّةً دافعةً تأثيرية معاكسة ε . وعليه، يكون للملفّ حثّ ذاتي L يُعطى من العلاقة]

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (9 - 21)$$

[* الطاقة المختزنة في الملفّ L الذي يحمل تيارًا I تُعطى بالعلاقة $U = \frac{1}{2}LI^2$. هذه الطاقة يمكن تخيّلها بأنّها طاقة مُختزنة في المجال المغناطيسي للملف. وتُعطى كثافة الطاقة u لأيّ مجال مغناطيسي B بالعلاقة]

$$u = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad (10 - 21)$$

[* عندما يوصل محث L مع مقاومة R على التوالي مع مصدر للقوة الدافعة V، فإنّ التيار ينمو في الدارة حسب العلاقة

$$I = \frac{V}{R}(1 - e^{-t/\tau})$$

حيث $\tau = L/R$، وتُسَمّى الثابت الزمني للدارة. إذا أُزيلت البطارية فجأةً من دارة المحث والمقاومة، فإنّ التيار يتناقص حسب العلاقة

$$[I = I_{\max}e^{-t/\tau}$$

[* المفاعلة الحثية والسّعويّة (X) تُعرّف كما في المقاومة بأنّها النسبة بين الجهد والتيار (إما قيمة جذر متوسط المربعات rms أو قيمة الذروة $(Peak)$). حول المحث كما يلي:

$$V = IX_L \qquad (11 - 21أ)$$

وحول المكثف كالآتي:

$$V = IX_C \qquad (12 - 21 ب)$$

تزداد مفاعلة المحث مع التردد حسب العلاقة

$$X_L = 2\pi fL \qquad (11 - 21 ب)$$

أمّا مفاعلة المكثف فتتناقص مع التردد f حسب العلاقة

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (12 - 21 ب)$$

يكون التيار في المقاومة دائمًا متفقًا بالطور مع فرق الجهد حولها. ولكن بالنسبة إلى المحث، فإنّ التيار يتخلف عن الجهد بزاوية 90°، بعكس ما في المكثف حيث يسبق التيار الجهد بزاوية 90°.]

[* في دارة المحث والمقاومة والمكثف (LRC) الموصولة على التوالي، فإنّ **الممانعة** الكلية Z تعرف من المعادلة المكافئة لقانون أوم للمقاومة $V = IR$ كما يلي:

$$V_{\rm rms} = I_{\rm rms}Z \quad \text{أو} \quad V_0 = I_0Z \qquad (14 - 21)$$

وتُعطى Z بالعلاقة الآتية:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (15 - 21أ)$$

[* دارة المحث والمقاومة والمتسع (LRC) على التوالي يظهر فيها رنين عند تردد يعطى على الصورة الآتية:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (19 - 21)$$

قيمة جذر متوسط المربعات $(rm\ s)$ للتيار في الدائرة تكون أكبر ما يمكن عند تطبيق جهد تردده يساوي f_0.]

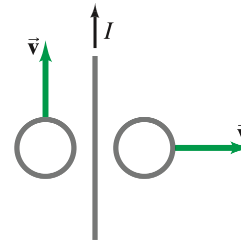
أسئلة

1. ماذا ستكون الميّزات في تجارب فارادي (الشكل 21 – 1) باستخدام ملفات لها عدة لفات؟

2. ما الفرق بين التدفق المغناطيسي والمجال المغناطيسي؟

3. لو افترضنا أنّك أمسكت حلقة دائرية من سلك، ثمّ دفعت قطبًا جنوبيًّا لمغناطيس أولًا بعيدًا عنك باتجاه مركز الدائرة فجأة. فهل سيتولّد تيار تأثيري في السلك؟ هل سيتولّد تيار تأثيري عند إمساك المغناطيس ساكنًا داخل الحلقة؟ هل سيتولد تيار تأثيري إذا سحبت المغناطيس؟ في كلّ حالة، إذا كانت إجابتك نعم، فحدّد اتجاه التيار.

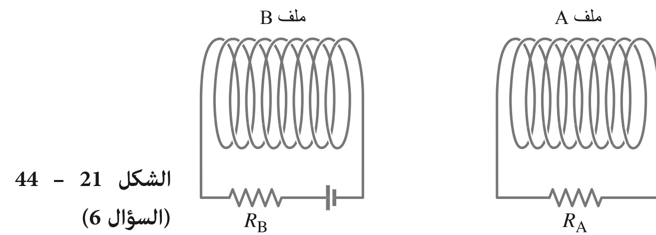
4. عروتان من سلك (فلزيتان) تتحركان في المنطقة المجاورة لسلك مستقيم طويل جدًّا يحمل تيارًا مستمرًا كما هو موضح في (الشكل 21 – 23). أوجد اتجاه التيار التأثيري المتولد في كلّ عروة.



الشكل 21 - 43
(السؤال 4)

5. لو افترضنا أنّك تنظر مع الخط الواصل خلال مركز عروتين فلزيتين منفصلتين إحداهما خلف الأخرى. إذا وصلت بطارية فجأة في العروة الأمامية بحيث تعطي تيارًا مع اتجاه عقارب الساعة: (أ) هل سيتولّد تيار تأثيري في العروة الثانية؟(ب) إذا كان كذلك، فمتى يبدأ هذا التيار؟ (جـ) متى يتوقف هذا التيار؟(د) بأيّ اتجاه يكون هذا التيار؟(هـ) هل هنالك قوة بين العروتين؟ (و) إذا كان كذلك، فما اتجاه هذه القوة؟

6. في (الشكل 21-44)، حدد اتجاه التيار التأثيري المتولد في المقاومة R_A عندما: (أ) يتحرك الملف B باتجاه الملف A. (ب) يتحرك الملف B بعيدًا عن الملف A . جـ) عندما تزداد المقاومة RB.



الشكل 21 - 44
(السؤال 6)

7. في الأوضاع التي تنتقل فيها إشارة صغيرة مسافة معينة فإنّنا نستخدم الكيبل المحوري الذي يتكوّن من سلك محاط بعازل، ثم يحاط بموصل أسطواني يحمل تيارًا راجعًا. ما ضرورة هذا؟

8. ما ميزات وضع سلكين كهربائيين يحملان تيارًا مترددًا في غلاف عازل مع بعضهما بعضا؟

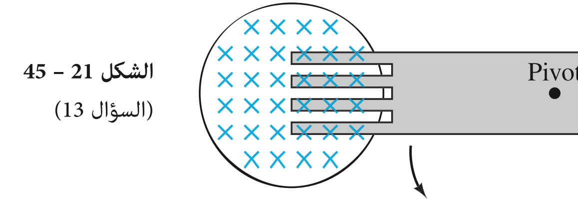
9. * فسّر سبب خفوت الضّوء عند تشغيل المحرك الكهربائي. وعند تشغيل سخان كهربائي، فإنّ الضوء يبقى خافتا ما دام السخان شغّالا. وضّح الفرق.

* **10.** استخدم (الشكلين 21 – 15، و 21 - 17) إضافة إلى قاعدة اليد اليمنى لتوضيح سبب كون العزم المعاكس في المولد معاكسًا للحركة.

* **11.** هل يعمل التيار الدوّامي على كبح الشغل على العجلة النحاسية أو المصنوعة من الألمنيوم؟ وهل يجب أن تكون العجلة مصنوعة من مادة فرّومغناطيسية؟ فسّر ذلك (انظر الشكل 21 – 20).

* **12.** من المقترح أنّ التيارات الدوّامية تستخدم للمساعدة في فصل النُّفايات الصلبة لإعادة إدارتها. في البداية، نفصل القطع الدقيقة والفلزية باستخدام مغناطيس يعمل على التيار المستمر. ومن ثَمّ تدفع النُّفايات للانزلاق نحو الأسفل على سطح مائل على مغناطيس طبيعي. كيف يساعد هذا على فصل المواد غير الحديدية (Al، Cu، Pb، brass) عن المواد غير الفلزية؟

* **13.** القضيب الفلزي الذي يدور حول محور، و ينتهي بشقوق في (الشكل 21 – 45) يسقط بسرعة أكبر خلال المجال المغناطيسي مقارنة بالقضيب المصمت. فسّر ذلك.



الشكل 21 – 45
(السؤال 13)

* **14.** إذا وضعت شريحة من الألمنيوم بين قطبي مغناطيس طبيعي كبير، فإنّها تحتاج إلى قوّة معينة لسحبها خارج المجال المغناطيسي حتى لو كانت الشريحة مصنوعة من مادة ليست فرومغناطيسية ولا تلامس الأقطاب. فسّر ذلك.

* **15.** القضيب المغناطيسي الذي يسقط داخل إطار فلزي رأسي يصل إلى سرعةٍ حدّيّةٍ حتى لو كان الإطار مفرغًا بحيث لا تكون هنالك مقاومة هواء. فسّر ذلك.

* **16.** يدور القضيب الفلزي حول إحدى نهايتيه بحرية في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي، ولكن في المجال المغناطيسي، فإنّ ذبذباته تتخامد بسرعة. فسّر ذلك. (هذا التخامد المغناطيسي يستخدم في عدد من الأجهزة العملية).

* **17.** محوّل مغلق يخرج منه أربعة أسلاك. كيف تستطيع إيجاد عدد لفات ملفيه دون الحاجة إلى فتح المحوّل؟ كيف تستطيع معرفة زوجي الأسلاك المترابطين مع بعضهما بعضا؟

* **18.** استخدام خطوط الجهد العالي مثل 600 V أو 1200 V تقلل من ضياع الطاقة في البيوت. لماذا لا تستخدم هذه الخطوط؟

* **19.** يحترق المحوّل المصمم ليأخذ تيّارًا مترددًا مقداره 120-V إذا وُصِلَ به تيّارٌ مستمرٌّ مقداره 120-V. فسّر ذلك [مساعدة: مقاومة الملف الابتدائي تكون في العادة صغيرة جدًّا].

* **20.** كيف ترتب ملفّين دائريين مستويين بحيث يكون معامل الحث المتبادل بينهما: (أ) أكبر ما يمكن؟ (ب) أقلّ ما يمكن؟ (دون إبعاد الملفين عن بعضهما مسافة كبيرة)؟

* **21.** هل القوة الدافعة للبطارية في (الشكل 21 - 33) تؤثر في الزمن الذي تحتاج إليه دارة الحث والمقاومة لتجتاز: (أ) نسبة معينة من القيمة القصوى المتوقعة للتيار؟ (ب) قيمة معينة للتيار؟ فسّر ذلك.

* **22.** في دارة محث، ومقاومة، ومتسع (LRC) هل يمكن لقيمة جذر متوسط المربعات (rm s) للجهد حول (أ) الحث (ب) المتسع، أن تكون أكبر من قيمة جذر متوسط المربعات لجهد المصدر؟ فسّر ذلك.

* **23.** باختصار، صف كيفية تأثير تردد مصدر القوة الدافعة التأثيرية في ممانعة كلّ من: (أ) المقاومة الخالصة. (ب) المتسع الخالص. (ج) الحث الخالص. (د) دارة LRC بالقرب من الرنين (قيمة R صغيرة). (هـ) دارة LRC بعيدًا عن الرنين (قيمة R صغيرة).

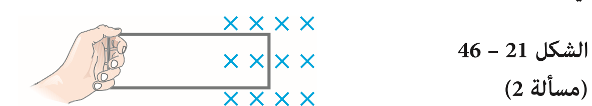
* **24.** صف كيفية جعل الممانعة في دارة LRC قيمة صغرى.

مسائل

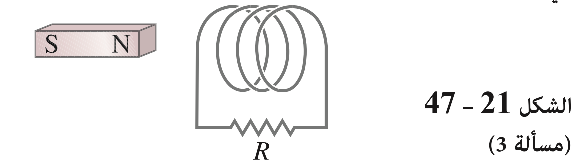
21-1 إلى 21 – 4 قانون فارادي في الحث

1. (I) التدفق المغناطيسي خلال ملفٍّ يتكوّن من لفّتين يتغيّر من -50 Wb إلى +38 Wb في 0.42 s. ما القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة في الملف؟

2. (I) الملفّ المستطيل الموضح في (الشكل 21 – 46) يدفع باتجاه مجال مغناطيسي يشير عموديًّا إلى الداخل. ما اتجاه التيار التأثيري المتولد؟


الشكل 21 – 46
(مسألة 2)

3. (I) القطب الشمالي للمغناطيس الموضّح في (الشكل 21 – 47) يدفع خلال الملف. بأيّ اتجاهٍ سيكون التيّارُ التأثيريُّ المتولّد في المقاومة R؟



الشكل 21 - 47
(مسألة 3)

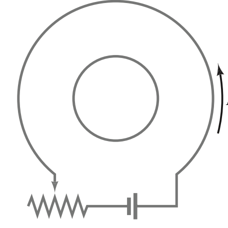
4. (I) عروةٌ دائريّةٌ (حلقة) قطرها 9.6-cm موضوعة في مجال مغناطيسي شدته 1.10-T. إذا أزيلت العروة من المجال في 0.15 s. فما متوسط القوّة الدافعة التأثيرية المتولّدة؟

5. (I) عروة قطرها 12.0 cm تقع بداية عمودية على مجال مغناطيسي شدته 1.5-T. إذا دارت العروة بحيث أصبح مستواها موازيًا لاتجاه المجال في 0.20 s. فما هو متوسط القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في العروة؟

6. (II) ملف قطره 10.2-cm يقع بداية بحيث يكون مستواه معامدًا لمجال مغناطيسي شدته 0.63 T ويتجه إلى الأعلى. خلال 0.15 s. تغير المجال بحيث أصبحت شدته 0.25 T ويشير إلى الأسفل. ما متوسط القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف؟

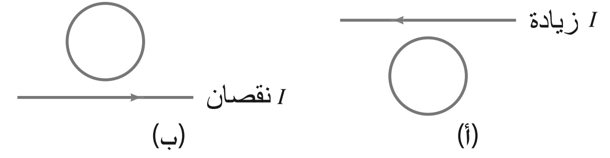
7. (II) عروة دائرية قطرها 15-cm تقع في مجال مغناطيسي شدته 0.50-T. (أ) عندما يكون مستوى العروة عموديًّا على خطوط المجال. ما هو التدفق خلال العروة؟ (ب) إذا دار مستوى العروة بحيث يصنع زاوية مقدارها 35° مع خطوط المجال. ما هي الزاوية θ في (المعادلة 21-1) لهذا الوضع؟ (ج) ما هو التدفق المغناطيسي خلال العروة عند هذه الزاوية؟

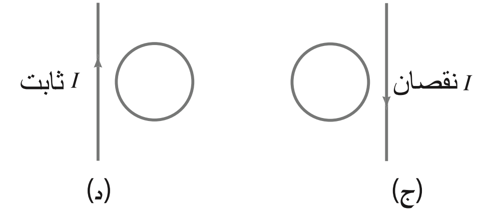
8. (II) (أ) إذا ازدادت المقاومة الموضّحة في (الشكل 21 – 48) ببطء. فما اتجاه التيار التأثيري المتولد في العروة الصغيرة التي تقع داخل العروة الكبيرة؟ (ب) ماذا سيكون اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الصغيرة إذا كانت خارج العروة الكبيرة إلى اليسار؟



الشكل 21 – 48
(مسألة 8)

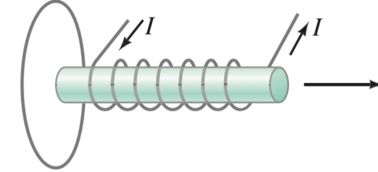
9. (II) ما اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الدائرية نتيجة للتيار الموضّح في كلّ جزءٍ من (الشكل 21 - 49)؟





الشكل 21 – 49 (مسألة 9)

10. (II) إذا دُفع الملفُّ الحلزونيُّ الموضّح في (الشكل 21 – 50) بعيدًا على العروة المبيّنة. بأي اتجاه سيكون التيار التأثيري المتولد في العروة؟



الشكل 21 – 50 (مسألة 10)

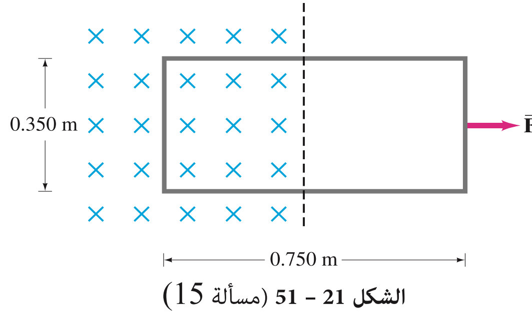
11. يؤثِّر مجال مغناطيسي عموديًّا على سلك على شكل خلقة دائرية قطرها 12.0 cm بمقدار يتغير من $+0.52\,T$ إلى $-0.45\,T$ خلال 180 ms، حيث تعني أن المجال يتجه بعيداً عن المراقب وتعني أنّ المجال يتجه نحو المراقب. (أ) احسب القوة الدافعة التأثيرية (emf). (ب) بأي اتجاه سيتدفق التيار التأثيري؟

12. إذا كان طول القضيب المتحرك في (الشكل 21-12) 12.0 cm، ويتحرك بسرعة 15.0 cm/s. وكان المجال المغناطيسي 0.800 T، إحسب (أ) القوة الدافعة التأثيرية النائمة. (ب) المجال المغناطيسي المؤثر في الالكترونيات في القضيب.

13. (II) عروةٌ دائريّةٌ في مستوى الورقة تقع في مجالٍ مغناطيسيٍّ شدته 0.75 T ويشير إلى داخل الورقة. إذا تغيّر قطر العروة من 20.0 cm إلى 6.0 cm في 0.50 s (أ) ما اتجاه التيار التأثيري المتولد؟ (ب) ما مقدار متوسط القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة؟ (ج) إذا كانت مقاومة العروة 2.5 Ω؟

14. (II) إذا كان طول القضيب المتحرك في (الشكل 21 – 12) هو 13.2 cm. وتتولّد فيه قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ مقدارها 120 mV عندما يتحرك في مجال مغناطيسي شدته 0.90-T. (أ) ما سرعته؟ (ب) ما المجال الكهربائي المتولد في القضيب؟

15. (II) جزءٌ من العروة المفردة الموضّحة في (الشكل21 – 51) موضوع داخل منطقة مجال مغناطيسي شدته 0.550 T. المقاومة الكلية للعروة 0.230 Ω. احسب القوة اللازمة لدفع العروة من المجال (إلى اليمين) بسرعة ثابتة مقدارها 3.40 m/s. أهمل الجاذبية الأرضية.



الشكل 21 – 51 (مسألة 15)

16. (II) ملفٌّ حلزونيٌّ عدد لفّاته 500 لفة ، وطوله 25 cm ، وقطره 2.5 cm. لف ملف من 10 لفات حول مركز الملف الحلزوني. إذا تغير التيار في الملف الحلزوني من 0 إلى 5.0 A في زمن مقداره 0.60 s. ما القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف القصير خلال هذا الزمن؟

17. (II) في (الشكل 21 – 12). إذا كان طول القضيب 30.0 cm. ومقاومته 2.5 Ω، ويتحرك بسرعة 1.6 m/s. وإذا كانت شدة المجال المغناطيسي 0.35 T ومقاومة الموصل الذي على شكل حرف U هي 25.0 Ω فاحسب: (أ) القوة الدافعة التأثيرية المتولدة. (ب) التيار في الموصل الذي على شكل حرف U. (ج) القوة الخارجية اللازمة لجعل سرعة القضيب ثابتة عند تلك اللحظة.

18. (III) ملفٌّ قطره 22.0-cm مصنوعٌ من 20 لفّةً من سلك نحاسي قطره 2.6 mm. إذا كان هنالك مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ عموديٌّ على مستوى الملفّ يتغيّر بمعدّل 8.65×10^{-3} T/s. فاحسب: (أ) التيّارَ المتولّدَ في الملف. (ب) المعدّل الذي تنتج فيه الطاقة الحرارية.

19. (III) يؤثر المجال المغناطيسي عموديًّا في عروة نحاسية دائرية قطرها 13.2-cm، ويتناقص بانتظام من 0.750 T إلى الصفر. إذا كان قطر السلك المصنوع منه العروة 2.25 mm. فما مقدار الشحنات التي تتحرك بحيث تتجاوز نقطة معينة من الملف خلال هذه العملية؟

21 - 5 المولدات الكهربائية

* **20.** (I) مولّدٌ بسيطٌ يُستخدم لإنتاج جهد قيمة الذروة له 24.0 V . إذا كان الدوار المربّع له يتكوّن من لفائف مربّعة طول ضلعها 6.0 cm على الجوانب. وتدور في مجال مغناطيسيٍّ شدّته 0.420 T بمعدّل 60.0 rev/s. كم عدد اللفّات الملفوفة على الدوّار المربّع؟

* **21.** (II) يتحرّك مولِّدُ سيارة بمعدّل 1100 rpm فينتج 12.4 V. ما هو الجهد الناتج إذا تحرك بسرعة دوران مقدارها 2500 rpm بافتراض عدم تغير أيّ شيء آخر؟

* **22.** (II) أثبت أنّ جهد متوسط المربعات لمولد جهد متردد (الجزء 18 – 7) هو $V_{rms} = NAB\omega/\sqrt{2}$ حيث $\omega = 2\pi f$.

* **23.** (II) يتكون مولد بسيط من 320 لفة مربعة، طول ضلعها 21.0 cm. كم يجب أن تكون سرعته في مجال مغناطيسي شدته 0.650-T حتى يعطي جهدًا قيمة الذروة له 120-V؟

* **24.** (II) ملفٌّ دوّارٌ قطره 8.0 cm. وعدد لفاته 450 لفة يدور بمعدل 120 rev/s في مجال مغناطيسي شدته 0.55 T. (أ) ما قيمةُ جهدٍ متوسّطِ المربّعات (V_{rms}) الناتج من هذا المولد؟ (ب) ماذا يجب أن يكون تردد الدوران لمضاعفة قيمة V_{rms}؟

* **25.** (II) مولّدٌ يدور بتردّدٍ 85 Hz في مجال مغناطيسيٍّ شدّته 0.030 T. إذا كان عدد لفاته 1000 لفة، وينتج جهدًا قيمة جذر متوسط المربعات (rms) له 150 V، وتيارًا قيمة جذر متوسط المربعات له 70.0 A (أ) ما قيمة الذروة للتيار المتولد؟(ب) ما مساحة كلّ لفة في الملف؟

* 21 – 6 القوة الدافعة التأثيرية الراجعة والعزم

* **26.** (I) محرّكٌ كهربائيٌّ مقاومةُ الدوّار له 3.25 Ω. إذا كان يسحب 8.20 A عندما يدور بالسرعة القصوى ويوصل بجهد مقداره 120-V، فكم يكون مقدار القوة الدافعة التأثيريّة الراجعة؟

* **27.** (I) القوّةُ الدافعةُ التأثيريّةُ الراجعة في محرّكٍ تساوي 72 V عندما يعمل بمعدل 1800 rpm. ماذا ستكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة إذا تحرك بمعدل 2500 rpm إن لم يتغير المجال المغناطيسي؟

* **28.** (II) القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في محرك تساوي 95 V عندما يعمل بمعدل 1000 rpm. كيف تُغير المجال المغناطيسي للمحرك إذا أردت أن تقلل القوة الدافعة التأثيرية الراجعة إلى 65 V عندما يعمل المحرك بمعدل 2500 rpm؟

* **29.** (II) كم سيكون التيار في المحرك في (المثال 21 - 9) إذا تسبب الحمل بدوران المحرك بنصف سرعته؟

21 – 7 المحوّلات

[افرض أنّ كفاءة المحوّل 100% إلا إذا ذكر غير ذلك.]

30. (I) محوّل مصمم للتحويل من 120 V إلى 10, 000 V. إذا كان عدد لفات ملفه الابتدائي 164 لفة. فكم عدد لفات الملف الثانوي؟

31. (I) محوّل عدد لفات ملفه الابتدائي 320 لفة. والثانوي 120 لفة. ما نوع هذا المحوّل؟ بأيّ نسبة يغير الجهد؟ وبأيّ نسبة يغيّر التيار؟

32. (I) محوّل رافع يزيد الجهد من 25 V إلى 120 V. ما هو التيار في الملف الثانوي مقارنة بالملف الابتدائي؟

33. (I) إشارة النيون تحتاج إلى 12 kV لكي تعمل. لتشغيلها من خط جهد مقداره 240 V. ماذا يجب أن تكون نسبة لفات الملف الثانوي إلى الملف الابتدائي للمحوّل المستخدم؟ ماذا ستكون الفولتية الخارجة إذا استخدم المحوّل بشكل معاكس؟

34. (II) محوّلٌ يُستخدم في القطارات يعمل على فرق جهد متردد مقداره 120 V يسحب 0.35 A، في حين يزود القطار بتيار مقداره 7.5 A. (أ) ما هو الجهد الذي يظهر على السكك؟ (ب) هل المحوّل رافع أم خافض للجهد؟

35. (II) الجهدُ الخارجُ من محوّلٍ قدرته 95-W يساوي 12 V والتيار الداخل يساوي 22 A. (أ) هل هذا محوّل رافع أم خافض للجهد؟ (ب) بأيّ نسبة سوف يزداد الجهد؟

36. (II) محوّلٌ عدد لفّاتِ ملفِّهِ الابتدائي 330 لفة. وعدد ملفات الملف الثانوي 1340 لفة. الجهد الداخل يساوي 120 V والتيار الخارج يساوي 15.0 A. ما هو الجهد الخارج؟ وما هو التيار الداخل؟

37. (II) إذا وصلت الكهرباء مدينة بقدرة 30 MW، وعلى جهد 45 kV (rms) من مولد كهرباء خلال خطوط نقل مقاومتها 4.0-Ω. احسب كلا من: (أ) القوة الدافعة الكهربائية عند نهاية خطوط المولّد. (ب) نسبة القدرة الضائعة في الخطوط.

38. (II) وصلت الكهرباء مدينة بقدرة 65 kW من خلال خطين مقاومتهما 0.100-Ω. احسب كمية القدرة التي توفّر إذا ازداد الجهد من 120 V إلى 1200 V ثم يخفض مرة أخرى بدلا من توصيله مباشرة على جهد مقداره 120 V. افرض أنّ كفاءة المحوّلات تساوي 99%.

* 21 - 9 الحثّ

* **39.** (I) إذا تغيّر التيّار في ملفٍّ معامل حثه الذاتي 180-mH من 25.0 A إلى 10.0 A في زمن مقداره 350 ms. ما مقدار القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟

* **40.** (I) ما معامل الحثّ الذاتيّ لملفٍّ ينتج قوّةً دافعةً تأثيرية مقدارها 2.50 V عند تغير التيار فيه من −28.0 mA إلى +31.0 mA في زمن مقداره 12.0 ms؟

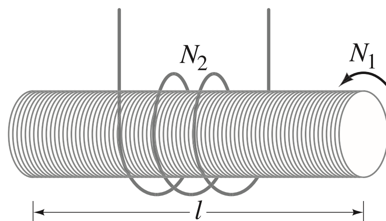
* **41.** (I) ما معامل الحثّ L لملفٍّ هوائيٍّ طوله 0.60-m وقطره 2.9 cm وعدد لفاته 10,000 لفة؟

* **42.** (I) كم عدد اللفات اللازمة لعمل ملف هوائي معامل حثه الذاتي 2.5 cm إذا كان طوله 30.0-cm وقطره 5.2 cm؟

* **43.** (II) محث أسطواني مملوء بالهواء عدد لفاته 2800 لفة وقطره 2.5 cm وطوله 28.2 cm. (أ) ما معامل حثه الذاتي؟ (ب) كم عدد اللفات التي تحتاج إليها ليكون له معامل الحث نفسه إذا كان قلب الملف مصنوعا من الحديد؟ افرض أنّ نفاذية الحديد المغناطيسية 1200 مرة أكبر من نفاذية الفراغ.

* **44.** (III) ملف مقاومته 2.25-Ω ومعامل حثه الذاتي 440-mH. إذا كان التيار 3.00 A ويزداد بمعدل 3.50 A/s. فما فرق الجهد بين طرفي الملف عند هذه اللحظة؟

* **45.** (III) ملف حلزوني طويل طوله l ومساحة مقطعه A ويحتوي على N_1 لفة متراصة. لُفَّ عليه ملفٌّ آخر عدد لفاته N_2 بشكل معزول كما في (الشكل 21-25). على افتراض أنّ التدفق الناتج من الملف 1 جميعه (الحلزوني) يمر خلال الملف 2. احسب معامل الحث المتبادل.



الشكل 21 - 52 (مسألة 45)

* **46.** (III) إذا قمنا بفكّ اللفات المتراصة على ملف لعمل لفات متراصة على ملف آخر له ضعف القطر. ما النسبة التي يتغير فيها معامل الحث؟

21 – 10 الطاقة المغناطيسية المختزنة

* **47.** (I) المجال المغناطيسي داخل ملف حلزوني هوائي طوله 36 cm وقطره 2.0 cm يساوي 0.80 T. ما مقدار الطاقة المختزنة في هذا المجال تقريبًا ؟

* **48.** (II) عند لحظةٍ معيّنة، كان التيار المار في محثّ 50.0 mA ويزداد بمعدّل 115 mA/s. ما الطاقة الابتدائية المختزنة في هذا المحثّ على افتراض أنّ معامل حثه يساوي 60.0 mH؟ وكم هو الوقت اللازم حتى تزداد الطاقة إلى عشرة أضعاف قيمتها الابتدائيّة؟

* **.49** (II) افرض أنّ متوسط المجال المغناطيسي للأرض هو 0.50×10^{-4} T بالقرب من السطح. احسب الطاقة الكلية المختزنة في هذا المجال في أول 10 km فوق سطح الأرض.

* 21 – 11 دائرة محثّ ومقاومة (LR)

* **.50** (II) أوجد $\Delta I/\Delta t$ عند $t = 0$ (عند وصل البطارية) في دائرة المحث والمقاومة الموضحة في (الشكل 21 – 33). وبيّن أنه إذا استمر I بالزيادة في هذا المعدّل، فإنه سيصل قيمته القصوى خلال فترة تساوي الثابت الزمني.

* **.51** (III) بعد كم ثابت زمني τ يصل التيار في (الشكل 21 – 33) إلى: (أ) 10% ؛ (ب) 1.0% ؛ (ج) 0.1% من قيمته القصوى؟

* **.52** (III) ملفان حلزونيان متراصّان لهما الطول نفسه ومساحة المقطع نفسها، إلا أنّ الملف 1 يستخدم سلكًا سماكته نصف سماكة السلك في الملف 2. ما النسبة بين: (أ) معاملي حثيهما؟ (ب) الثابت الزمني الحثي لهما (افترض عدم وجود مقاومات أخرى في الدائرة)؟

* 21 – 12 دارات التيار المتردد والمفاعلة

* **.53** (I) ما مفاعلة مواسع سعته 7.20-μF عند تردد (أ) 60.0 Hz ؟ (ب) 1.00 MHz؟

* **.54** (I) عند أيّ تردد تكون مفاعلة محث معامل حثه 22.0-mH مساوية لـ 660 Ω؟

* **.55** (I) عند أيّ تردد تكون مفاعلة مواسع سعته 2.40μF مساوية لـ 6.70 kΩ؟

* **.56** (II) ارسم شكلا يوضح مفاعلة مواسع سعته 1.0-μF كدالة في التردد من 10 إلى 1000 Hz.

* **.57** (II) ارسم شكلًا يوضح مفاعلة محث معامل حثه 1.0-mH كدالة في التردد من 100 إلى 10,000 Hz.

* **.58** (II) احسب المفاعلة و I_{rms} في ملف مذياع معامل حثه 160-mH، وموصول بجهد (rms) 240-V، ويعمل على خط متردد بتردد 10.0-kHz أهمل المقاومة.

* **.59** (II) ملف حثي يعمل على 240 V و 60.0 Hz يسحب 12.8 A . ما معامل حثه؟

* **.60** (II) (أ) ما مفاعلة متسع معزول تمامًا سعته 0.030-μF وموصول بجهد مقداره (rms) 2.0-kV وتردده 720-Hz؟ (ب) ما قيمة تيار الذروة؟

* 21-13 دارات المحث والمقاومة والمتسع (LRC)

* **.61** (I) مقاومة مقدارها 30-kΩ موصولة على التوالي مع محث معامل حثه 45-mH، ومصدر تيار متردد. احسب ممانعة الدائرة إذا كان تردد المصدر: (أ) 50 Hz. (ب) 3.0×10^4 Hz.

* **.62** (I) مقاومة مقدارها 3.5k Ω موصولة على التوالي مع متسع سعته 4.0-μF، ومصدر تيار متردد. احسب ممانعة الدائرة إذا كان تردد المصدر: (أ) 60 Hz. (ب) 60,000 Hz.

* **.63** (I) لمصدر جهد مقداره 120-V rms، وتردده 60-Hz، فإنّ تيارًا مقداره 70m A، ويمر خلال 1.0 s في جسم الإنسان يكون مميتًا. ماذا يجب أن تكون ممانعة جسم الإنسان حتى يحدث هذا؟

* **.64** (II) ما مقاومة ملف إذا كانت ممانعته 235 Ω ومفاعلته 135 Ω؟

* **.65** (II) ما الممانعة الكلية، زاوية الطور و Irms في دائرة LRC موصولة بجهد مقداره (rms) 725-V وتردده 10.0-kHz، إذا كانت L=22.0 mH، R= 8.70k Ω و C= 6250 pF؟

* **.66** (III) مقاومة مقدارها 2.5-kΩ موصولة على التوالي مع محث معامل حثه 420-mH ومع مصدر متردد. عند أيّ تردد تكون الممانعة ضعف قيمتها عند 60 Hz؟

* **.67** (III) (أ) ما هو Irms في دائرة RL عند تطبيق جهد مقداره 120-V rms، وتردده 60.0-Hz حيث R = 1.80 kΩ و L = 350 mH؟ (ب) ما زاوية الطور بين الجهد والتيار؟ (ج) ما هي Vrm s حول كلّ من R و L؟

* **.68** (III) ما هو rms في دائرة RC إذا كانت R = 8.80 kΩ و C = 1.80 μF ، والجهد المطبق يساوي 120 V عند تردد 60.0 Hz؟ (ب) ما زاوية الطور بين الجهد والتيار؟ (ج) ما قراءة الفولتميتر حول كلّ من R، و C؟

21 – 14 الرنين في الدارات المتردد

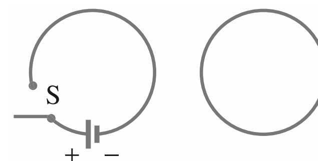
* **.69** (I) مواسع سعته 3500-pF موصول مع محث معامل حثه 55.0-μH ومقاومته 3.00 Ω. ما تردد الرنين لهذه الدائرة؟

* **.70** (I) المكثف المتغير في منقي الموجات في المذياع له سعة تساوي 2800 pF عندما يوضع على محطة ترددها 580 kHz. (أ) ماذا يجب أن تكون سعته عند محطة تعمل على تردد مقداره 1600 kHz؟ (ب) ما هو معامل الحث (على افتراض أنه ثابت)؟

* **.71** (II) في دائرة، (LRC) إذا كان L=14.8 mH و R= 4.40 Ω. (أ) ما قيمة C اللازمة لإنتاج رنين عند 3600 Hz؟ (ب) ما أقصى تيار عند الرنين إذا كان جهد الذروة للمصدر الخارجي يساوي 150 V؟

مسائل عامة

.72 لو افترضنا أنّك تنظر إلى حلقتين معدنيتين في مستوى الورقة كما هو موضح في (الشكل 21-53). عند فتح المفتاح S في الملف الأيسر. (أ) ما اتجاه التيار التأثيري المتولد في العروة الثانية؟ (ب) ما الوضع بعد زمن طويل؟ (ج) ما اتجاه التيار في العروة اليمنى إذا تحركت بسرعة، وبشكل أفقي إلى اليمين؟



الشكل 21 - 53 (مسألة 72)

.73 عروةٌ مربّعةٌ طولُ ضلعِها 24.0 cm، ومقاومتها 5.20 Ω تقع في البداية في مجال مغناطيسي شدته 0.665-T بحيث يكون مستواها عموديًّا على $\vec{B}$. ثم أزيلت من المجال في 40.0 ms. احسب. الطاقة الكهربائية المستنفدة في هذه العملية.

.74 مصباح مكتب قدرته 45 W ويحتاج إلى 12 V فقط. يحتوي المصباح على محوّل يحوّل من الجهد المنزلي الذي قيمته 120-V (أ) هل المحوّل رافع للجهد أم خافض له؟ (ب) ما هو التيار في الملف الثانوي عندما يكون المصباح مضاءً؟ (ج) ما هو التيار في الملف الابتدائي؟ (د) ما هي مقاومة المصباح عندما يكون مضاءً؟

75. تنتج القدرة الكهربائيّةُ من مولّدٍ على 24 kV في مكانٍ يبعد 118 km عن المدينة التي تحتاج إلى 50 MW من القدرة الكهربائية على جهد 12 kV. هنالك خطان لنقل القدرة من المصدر إلى المدينة. مقاومة كلّ منهما 0.10 Ω/km. ماذا يجب أن يكون الجهد الخارج من المحوّل الموجود عند المصدر حتى تكون الكفاءة الكلية لنقل القدرة 98.5% على افتراض أنّ المحوّل جيّد.

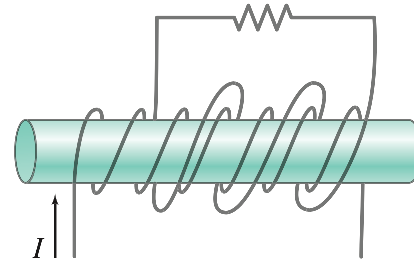
76. إذا كانت لفّات الملفّ الابتدائيّ لمحوّلٍ كفاءته 80% موصولة بجهد متردد مقداره 110-V. لفات الملف الثانوي موصولة حول مصباح مقاومته 2.4 Ω وقدرته 75 W. احسب كلًّا من:(أ) التيار المار في لفات الملف الابتدائي للمحوّل. (ب) نسبة عدد لفّاتِ الملفّ الابتدائيّ إلى عدد لفّاتِ الملفّ الثانويّ للمحوّل.

77. زوجٌ من خطوط نقل القدرة مقاومةُ كلٍّ منها 0.80-Ω، ويحمل تيارًا مقداره 740 A على مسافة 9.0 km. إذا كانت قيمة جذر متوسط المربعات (rms) للجهد الداخل 42 kV فاحسب: (أ) الجهد الخارج. (ب) القدرة المدخلة. (ج) القدرة المفقودة في الخطين. (د) القدرة الخارجة.

78. سكتّان عديمتا المقاومة تبعدان عن بعضهما 32 cm موضوعتان على منحدر يميل بزاوية 6.0° وموصولتان من القاع بمقاومة مقدارها 0.60-Ω. في القمّة هنالك قضيب نحاسي كتلته 0.040 kg (مهمل المقاومة) يقع على السكتين. إذا كانت هذه الأدوات موجودة في مجال مغناطيسي عمودي شدته 0.55-T، فما السرعة الحدية (الثابتة) للقضيب عندما ينزلق دون احتكاك نحو أسفل السكتين؟

79. أثبت أنّ القدرة المفقودة في خطوط النقل تعطى بالعلاقة $P_L = (P_T)^2 R_L/V^2$، حيث P_T هي القدرة المنقولة للمستخدم، V هو الجهد المعطى، و R_L هي مقاومة الخط الناقل.

80. ملفٌّ عدد لفّاته 150 لفّةً، ونصف قطره 5.0 cm ومقاومته 12 Ω. ملفوف حول ملف حلزوني عدد لفاته 230 turns/cm ونصف قطره 4.5 cm، انظر (الشكل 21 – 54). إذا تغيّر تيّار الملفّ الحلزونيّ من 0 A إلى 2.0 A في زمن مقداره 0.10 s فاحسب مقدار التيّارِ التأثيريّ المتولّد في الملفّ واتجاهه.



الشكل 21 – 54 (مسألة 80)

81. جهازٌ إلكترونيٌّ نريد حمايته من الزيادة المفاجئة في التيار. عمليًّا، عند تشغيل مصدر القدرة يجب ألا يتجاوز التيار 7.5 mA في أول 120 μs. إذا كانت مقاومة الجهاز ومُصَمَّمٌ ليعمل على 55 mA، كيف تحمي هذا الجهاز؟

82. ملفٌّ عدد لفّاته 25، وقطره 12.5-cm موضوع بين قطبي مغناطيس. عندما يعمل المغناطيس، يتغيّر التدفق خلال الملفّ بحيث يولّد قوّةً دافعةً تأثيريّةً. بأيِّ معدّل (بوحدة T/ s) يجب أن يتغيّر المجال المغناطيسي إذا كانت القوة الدافعة التأثيرية المتولّدة 120 V.

83. * احسب جهد الذروة الناتج من مولّدٍ بسيطٍ يتكوّن من دوّار مربّع طول ضلعه 6.60 cm. إذا كان الدوّار يحتوي 155 لفّةً ويدور في مجال مغناطيسي شدته 0.200 T وبمعدل 120 rev/s.

84. * القيمة الكبرى النموذجية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي في أحد المختبرات تبلغ 1.0×10^4 V/m و 2.0 T (أ) احسب كثافة الطاقة لكلا المجالين. (ب) ما مقدار المجال الكهربائي اللازم لإنتاج كثافة الطاقة نفسها للمجال المغناطيسي الذي شدته 2.0-T؟

85. * ما معامل الحثّ L لملفٍّ ابتدائي في محوّل جهده الداخل 220 V عند 60.0 Hz إذا كان التيار الذي يسحبه 5.8 A؟ افرض أنّ الملفَّ الثانوي لا يحتوي أيّ تيار.

86. * ملفٌّ معامل حثّه 130-mH ومقاومته 18.5 Ω، موصولٌ مع مواسع C ومصدر جهد تردده 1360-Hz. إذا كان التيار والجهد متفقين في الطور، فماذا يجب أن تكون قيمة C؟

87. * ملفٌّ حثّيٌّ يسحب تيّارًا مستمرًّا مقداره 2.5-A عند توصيله ببطارية جهدها 36-V. وعند توصيله بمصدر جهد متردّد قيمته (rms) 120-V وتردده 60-Hz، فإنه يسحب تيّارًا مقداره 3.8 A(rms). احسب معامل حثّ هذا الملف ومقاومته.

88. * محثّ، معامل حثّه 135-mH ومقاومته 2.0-Ω، وصل بمواسع سعته 20-μF، ومصدر جهد مقداره 45-V، وتردده 60-Hz. احسب كلًّا من: (أ) I_{rms} . (ب) زاوية الطور.

89. * يعرف **المعامل** Q لدائرة الرنين بأنّه النسبة بين الجهد حول المكثف (أو المحث) والجهد حول المقاومة عند الرنين. كلّما كانت Q أكبر كان منحنى الرنين أكثر حدّةً. (أ) أثبت أنّ المعامل Q يُعطى بالعلاقة $Q = (1/R)\sqrt{L/C}$. (ب) عند تردد رنين $f_0 = 1.0$ MHz، ماذا يجب أن تكون قيمة L و R حتى يكون المعامل Q يساوي 550؟ افرض أنّ $C = 0.010\ \mu$F.

إجابات التمارين

أ: 0.0102 Wb

ب: (أ) عكس اتجاه عقارب الساعة. (ب) مع اتجاه عقارب الساعة. (ج) صفر (د) عكس اتجاه عقارب الساعة.

ج: عكس اتجاه عقارب الساعة

د: 10 لفات



هذه الهوائيات الدائرية التي قطرها 25 m موجَّهةٌ لاستقبال موجات المذياع من الفضاء الخارجي. إنّ موجات الراديو هي موجات كهرومغناطيسية (EM). وتتراوح تردداتها من مئات قليلة من الهيرتز إلى نحو 100 MHz. وهذه الهوائيات توصل معًا إلكترونيًا لتحقيق تفاصيل أكثر. وهي جزءٌ من مصفوفة ضخمة في نيومكسيكو تبحث عن معلومات حول الكون.
تنبّأ مكسويل بوجود موجات EM من معادلاته المشهورة. والتي تعدّ ملخصا رائعا للكهرومغناطيسية.

الفصل 22

الموجات الكهرومغناطيسية



الشكل 22- 1 جيمس كلارك مكسويل

لقد كانت ذروة النظرية الكهرومغناطيسية في القرن التاسع عشر ممثلةً في التنبؤ. أو التحقق التجريبي بأنَّ موجات المجالات الكهرومغناطيسية تنتقل خلال الفضاء. وقد فتح هذا الإنجاز عالمًا واسعًا جديدًا من الاتصالات؛ ابتداء من التلغراف اللاسلكي. ومن ثَمَّ المذياع والتلفزيون. وحديثًا الهاتف المحمول. وأدوات التحكم عن بعد. وخلص إلى التنبؤ المثير للدهشة في أنّ الضوء موجة كهرومغناطيسية.
أمّا الإنجاز النظري للموجات الكهرومغناطيسية فيعزى إلى الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك مكسويل (1831 - 1879؛ شكل 22 - 1). الذي وحَّد في نظرية رائعة ظواهر الكهرباء والمغناطيسية كلّها.

1-22 المجالات الكهربائيّة المتغيرة تنتج مجالات مغناطيسيّة، معادلات مكسويل

إنّ تَطَوُّرَ نظرية الكهرومغناطيسية في بداية القرن التاسع عشر من قِبلِ أورستد وأمبير، والآخرين، لم يكن في الحقيقة بدلالة المجالات الكهرومغناطيسية. لقد أدخلت فكرة المجال لاحقًا بواسطة فاراداي، ولم تُستعمل على نطاقٍ واسعٍ إلى أن برهن مكسويل أنّ الظواهر الكهربائيّة والمغناطيسية كلّها يمكن وصفها باستعمال أربع معادلات فقط تتضمّن المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي. وتُعرَف هذه المعادلات **بمعادلات مكسويل**، وهي المعادلات الأساسية للكهرومغناطيسية. إنّها أساسية كما هو الحال في قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة، وقانون الجذب العام في الميكانيكا. وحتى يمكن القول إنّها أكثر أساسية لأنّها تتواءم مع نظرية النسبية (الفصل 26). أمّا قوانين نيوتن فليست كذلك؛ لأنّ الكهرباء والمغناطيسية كلّها محتواة في هذه المعادلات الأربع. وتعدّ معادلات مكسويل من أعظم انتصارات ذكاء الإنسان.

وعلى الرغم من عدم تقديمنا معادلات مكسويل بصورتها الرياضية لأنّها تتضمّن حساب التفاضل والتكامل، إلاّ أنّنا سنلخّصها بالكلمات كما يلي:

معادلات مكسويل

1) شكل معمَّمٌ لقانون كولوم يُعرف بقانون غاوس (البند 16-10) يربط بين المجال الكهربائيّ ومصدره، الشحنة الكهربائيّة.

2) قانون مشابه للمجال المغناطيسيّ، ما عدا أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ دائمًا مستمرة (متصلة) - لا تبدأ وتنتهي (كما تعمل خطوط المجال الكهربائيّ على الشحنات).

3) ينتج المجال الكهربائيّ من مجال مغناطيسيّ متغير (قانون فاراداي).

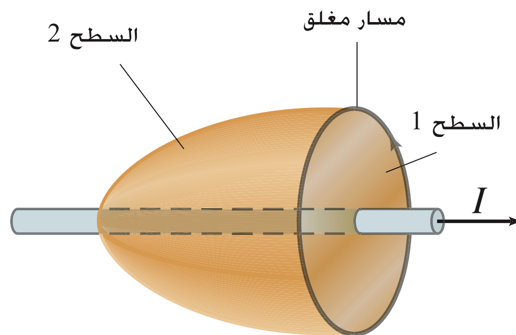
4) ينتج المجال المغناطيسيّ من تيّار كهربائيّ (قانون أمبير)، أو مجال كهربائيّ متغير.

قانون (3) هو قانون فاراداي (انظر الفصل 21، خاصة البند 21-4). الجزء الأول لقانون (4)، أي المجال المغناطيسيّ ينتج من تيّار كهربائي، اكتشفه أورستد. وتعطى العلاقة الرياضية بقانون أمبير (البند 20-8). أما الجزء الثاني من قانون (4) فهو موضوع جديد كليًّا تنبأ به مكسويل، الذي أشار إلى أنه إذا **كان المجال المغناطيسيّ المتغير ينتج مجالاً كهربائيًّا كما يعطي قانون فاراداي**، فإنّ العكس قد يكون صحيحًا أيضًا: سوف ينتج المجال الكهربائيّ المتغير مجالاً مغناطيسيًّا . وهذه هي نبوءة من مكسويل المعتمدة على مفهوم التماثل في الطبيعة.

تغيُّر $\vec{E}$
يُنتج $\vec{B}$

* معادلة مكسويل الرابعة (قانون أمبير بصورة موسعة)

لتتبُّع فكرة أنّ المجال الكهربائيّ يمكن أن ينتج مجالا مغناطيسيًا؛ نستعمل برهانًا غير مباشر الشيء ينص كما يلي: تبعًا لقانون أمبير (البند 20-8)، $\Sigma B_{\|} \Delta l = \mu_0 I$. أي، قسّم أيّ مسار مقفل إلى أجزاء قصيرة Δl، ثمّ اضرب كلّ جزء في المركبة الموازية للمجال المغناطيسيّ B عند ذلك الجزء، ومن ثمّ اجمع هذه النواتج كلّها على المسار المقفل كاملا. عندئذٍ، سوف يساوي المجموع μ_0 مضروبًا في التّيّار الكلي الذي يمر خلال السطح المحاط بالمسار المقفل. عندما طبقنا قانون أمبير للمجال حول سلك مستقيم (البند 20-8)، تخيلنا أنّ التّيّار يمر عبر المساحة الدائرية المغلقة بالعروة الدائرية. تلك المساحة هي السطح المنبسط 1 المبين في (الشكل 22-2). وعلى أيّ حال، يمكننا أيضًا استعمال السطح الذي يشبه الكيس، السطح 2 في (الشكل 22-2) كسطح لقانون أمبير لأنّ التّيّار نفسه يخترقه أيضًا.



الشكل 22-2 قانون أمبير مطبق على سطحين مختلفين محاطين بالمسار المقفل نفسه.
وبالفعل، فإنّ الأثر في معظم الأحيان يكون صغيرًا بحيث أدرك مكسويل أنّ الكشف عنه بالتجربة سيكون صعبًا.

والآن، تأمّل المسار المقفل في الحالة المبيّنة في (الشكل 22-3)، حيث يجري تفريغ مواسع. ينطبق قانون أمبير على سطح 1(التيّار I يمر خلال السطح 1) لكنّه لا ينطبق على سطح 2؛ لأنّه لا يُوجد تيّار يمر خلاله. هناك مجالٌ مغناطيسيّ حول السلك. لذا، فإنّ الجانب الأيسر من قانون أمبير ليس صفرًا حول المسار الدائري المغلق. وبما أنّه ليس هناك تيّار يتدفق خلال السطح 2، فإنّ الجانب الأيمن يساوي صفرًا لهذا السطح. ويبدو أنّ لدينا تناقضًا مع قانون أمبير. هناك مجال مغناطيسيّ موجود في (الشكل 22-3). فقط إذا كانت الشحنة تتدفق إلى صفيحتي المكثف أو بعيدًا عنهما. ويعني تغيّر الشحنة على الصفيحتين أنّ المجال الكهربائيّ بينهما متغيّر مع الزمن. حَلَّ مكسويل هذه المسألة في أنّ ليس هناك تيّار عبر السطح 2 في (الشكل 22-3) مفترضًا أنّ المجال الكهربائيّ المتغير بين الصفيحتين يكافئ تيّارًا كهربائيًّا، سمّاه تيّار الإزاحة I_D. وهكذا، يُسَمّى التيّار العادي **"تيّار التوصيل"**. ويصبح قانون أمبير كما عممه مكسويل كما يلي:

$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0(I + I_D)$$

وسينطبق قانون أمبير أيضًا على السطح 2 في (الشكل 22-3)، حيث I_D يعود إلى المجال الكهربائيّ المتغيّر. وبجمع (المعادلة 17-7) للشحنة على مواسع، $Q = CV$، مع (المعادلة 17-4أ) $V = Ed$، (والمعادلة 17-8)، $C = \epsilon_0 A/d$، يمكننا أن نكتب $Q = CV = (\epsilon_0 A/d)(Ed) = \epsilon_0 AE$ ويصبح عندها التيّار I_D

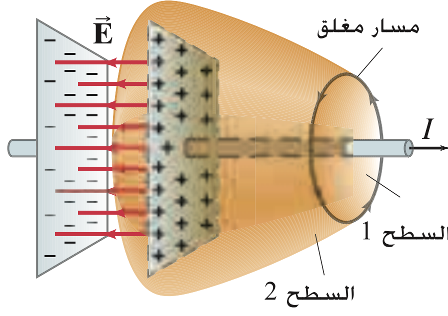
$$I_D = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$$

حيث $\Phi_E = EA$ هو **التدفق الكهربائيّ**، يعرف بصورة مناظرة للتدفق المغناطيسيّ (البند 21-2). وهكذا يصبح قانون أمبير

(تعميم) قانون أمبير

$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t} \qquad (22\text{-}1)$$

تتضمّن هذه المعادلة فكرة مكسويل في أنّ المجال المغناطيسيّ يمكن أن ينتج بواسطة مجال كهربائيّ متغير أو تغير تدفق كهربائي، وليس فقط بسبب تيّار توصيل عادي.

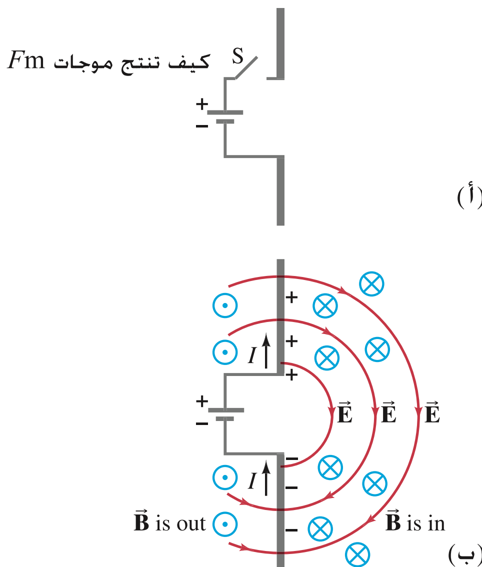


الشكل 22- 3. مواسع في أثناء التفريغ. لا يمر تيّار توصيل عبر السطح 2. حدّ إضافي نحتاج إليه في قانون أمبير.

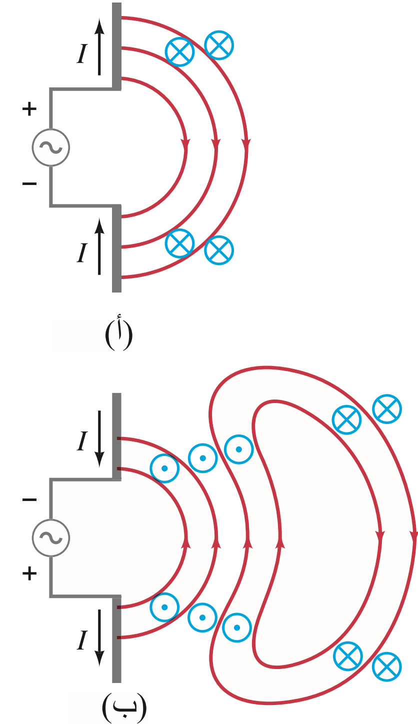
2-22 إنتاج الموجات الكهرومغناطيسية

وفقًا لما يراه مكسويل، فإنّ مجالًا مغناطيسيًّا سوف يُنْتَجُ في الفراغ بوجود مجالٍ كهربائيٍّ متغيّر. ومن هنا بدأ مكسويل استنتاجًا مدهشًا آخر: إذا كان المجال المغناطيسيّ المتغيّر ينتج مجالاً كهربائيًّا، فإنّ هذا المجال الكهربائيّ نفسه يكون متغيّرًا. وسوف ينتج هذا المجال الكهربائيّ المتغيّر بالتالي مجالاً مغناطيسيًّا متغيرًا كذلك، ينتج بدوره مجالاً كهربائيًّا، وهكذا دواليك. عندما اشتغل مكسويل بمعادلاته، وجد أنّ النتيجة المحصلة لهذه المجالات المتبادلة المتغيرة كانت موجة من المجالات الكهربائية والمغناطيسيّة التي يمكنها أن تنتشر في الفضاء! وسوف نختبر كيفية إنتاج مثل هذه **الموجات الكهرومغناطيسيّة** بطريقة بسيطة الآن. تأمّل قضيبين موصلين يمكن استخدامهما "كهوائي" (الشكل 22-4أ). وافرض أنّهما وُصلا بطرفي بطاريّة عبر مفتاح. سريعًا، يصبح القضيب العلوي مشحونًا بشحنةٍ موجبة والسفلي بشحنة سالبة. تتكوّن خطوط مجال كهربائيّ كما هو مبيّن في (الشكل 22-4 ب). وفي أثناء سير الشحنات، يتكوّن تيّار يُشار إلى اتجاهه (مساره) بأسهمٍ سود. لذا، يتكوّن مجالٌ مغناطيسيّ حول الهوائي. تحيط خطوط المجال المغناطيسيّ بالهوائي ذي شكل القضيب. لذلك، في (الشكل 22-4)، $\vec{\mathbf{B}}$ يشير نحو الداخل (⊗) ونحو خارج الصفحة (⊙) على اليسار. والآن نسأل: على أيّ مسافة تمتد هذه المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية؟ في الحالة السكونية، تمتدّ المجالات إلى مسافات لا نهائية. ولكن عند غلق المفتاح (الشكل22-4) تظهر المجالات بسرعة في المناطق القريبة، إلا أنها تحتاج إلى زمن للوصول إلى المناطق البعيدة. كلا المجالين: الكهربائيّ والمغناطيسي يخزنان طاقة، وهذه الطاقة يصعب نقلها إلى النقاط البعيدة بسرعة لا نهائية.

الشكل 22- 9. المجالات الناتجة من شحنة تتدفق خلال موصلات. إنّ انتقال المجالات $\vec{\mathbf{E}}$، $\vec{\mathbf{B}}$ إلى الخارج نحو نقاط بعيدة يستغرق وقتًا. المجالات مبينة إلى يمين الهوائي. ولكنها تتحرك في الاتجاهات جميعها بصورة متماثلة حول الهوائي (العمودي).



الآن، ننظر إلى الوضع في (الشكل 22-5)، حيث نصل الهوائيّ بمولّدٍ مُتناوب (متردد) (ac). في (الشكل 22-5أ)، التوصيل تمّ (للتو). تبدأ الشحنات بالتراكم وتتشكل المجالات كما في (الشكل 22-4 ب). الإشارتان + و − في (الشكل 22-5أ) تشيران إلى الشحنة النهائية على كلّ قضيب. وتشير الأسهم السود إلى اتجاه التيّار. أما المجال الكهربائيّ، فتمثله الخطوط الحمراء في مستوى الصفحة، والمجال الكهربائيّ تبعًا لقاعدة اليد اليمنى إلى داخل الصفحة في (الشكل 22 - 5ب) أو إلى خارجها. جهد المولد المتناوب انعكس اتجاهه؛ تغير اتجاه التيّار والمجال المغناطيسيّ الجديد في الاتجاه المعاكس. ولأنّ المجالات الجديدة عكست اتجاهاتها، فإنّ الخطوط القديمة تنثني لتتصل ببعض الخطوط الجديدة، لتشكل حلقات (عُرى) مغلقة*. إنّ المجالات القديمة على أيّ حال لا تختفي فجأة، إنّها في طريقها إلى أماكن بعيدة. وبالفعل، ولأنّ المجال المغناطيسيّ المتغير ينتج مجالاً كهربائيًا، والمجال الكهربائيّ المتغير ينتج مجالا مغناطيسيًا، فإنّ هذا الدمج من المجالات المتغيرة التي تتحرك بعيدًا بالفعل، تعتمد على نفسها، ولم تعد تعتمد على شحنات الهوائي.

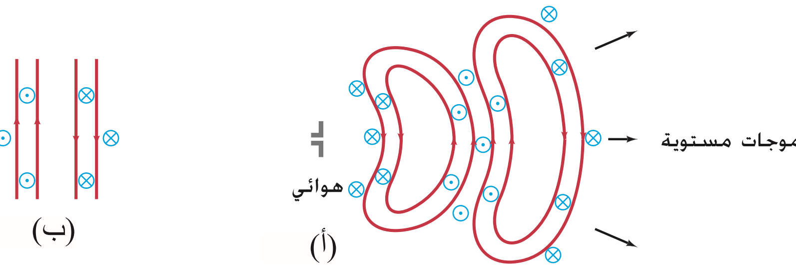


الشكل 22- 5. يوضح التتابع مجالات كهربائية ومغناطيسية تنتشر على موصلين، (الهوائي) متصل بمصدر متردد (ac) انظر النص.

تصبح المجالاتُ القريبةُ من الهوائيّ، والتي تُسَمّى المجالَ القريب، معقّدةً تمامًا، لكنّنا لسنا مهتمّين بها. إنّنا نهتمّ بصورة رئيسة بالمجالات البعيدة عن الهوائي (التي نستقبلها بشكل عام) المسماة **"مجال الاشعاع"**. وتشكّل خطوط المجال الكهربائيّ عُرى كما هو موضّح في (الشكل 22-6). وتستمرُّ في الحركة نحو الخارج. في حين تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ عُرى مُغلقة لكنّها ليست فقط على يمين المصدر، وتنتقل المجالات في الاتجاهات جميعها.

تكون شدة المجالات أكبر ما يمكن بالاتجاه العمودي على الشحنات المهتزة، وتقل للصفر في اتجاه الاهتزاز تحت الهوائي وفوقه في (الشكل 22 - 6).

الشكل 22- 6 (أ) مجالات الإشعاع (بعيدًا عن الهوائي) ناتجة من إشارة جيبية في الهوائي. تمثل الحلقات الحمراء المغلقة خطوط مجالات كهربائية. خطوط المجال المغناطيسيّ، عمودية على الصفحة وتمثل بـ ⊙ و ⊗، زرقاء، وتشكل أيضًا حلقات مغلقة. (b) بعيدًا جدًا عن الهوائي، تكون مقدمات الموجات (خطوط المجال) في الأساس منبسطة على مساحات واسعة، وتدعى موجات مستوية.

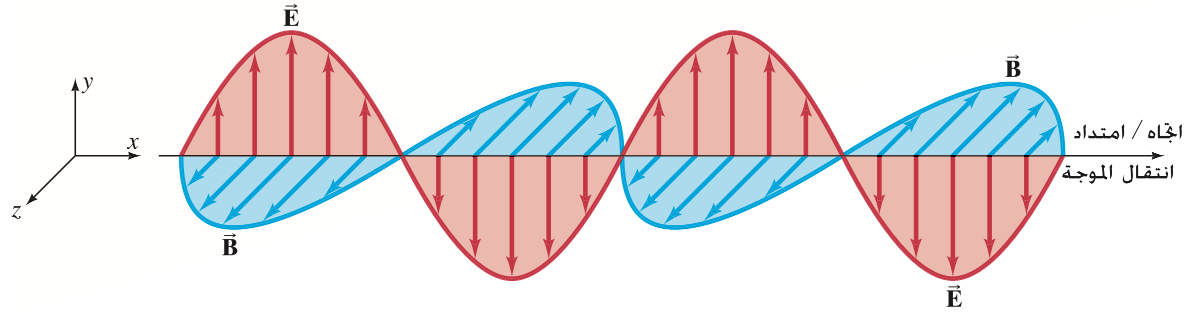


ولقد وجد أنّ مقادير كلٍّ من $\vec{\mathbf{E}}$، $\vec{\mathbf{B}}$ في مجال الإشعاع تقلّ مع المسافة على الصورة $1/r$. (قارن ذلك مع المجال الكهرسكوني في قانون كولوم، حيث $\vec{\mathbf{E}}$ تقل بصورة $(1/r^2)$. وتتناسب الطاقة التي تنقلها الموجة الكهرومغناطيسية (مثل أيّ موجة، الفصل 11) مع مربع الاتساع E^2 أو B^2، كما ستناقش في (البند 22 - 7). لذا، تقلّ شدة الموجة بصورة $1/r^2$.

ويمكن ملاحظة كثير من الأشياء عن مجال الإشعاع من (الشكل 22 - 6). أولا، يتبادل المجالان الكهربائيّ والمغناطيسيّ في الاتجاه عند أيّ نقطة، ويكونان عموديّان الواحد منهما على الآخر ($\vec{\mathbf{B}}$ يكون لداخل الصفحة عند بعض النقاط، وخارجها عند نقاط أخرى؛ $\vec{\mathbf{E}}$ يشير نحو الأعلى عند بعض النقاط، ونحو الأسفل عند نقاط أخرى). ولذلك، تختلف شدة المجال من أقصى قيمة باتجاه معين إلى صفر، ثم إلى قيمة قصوى باتجاه آخر. تكون المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية (بالطور نفسه)؛ أي أنّ طوريهما صفر عند النقاط نفسها، ويصلان إلى القيمة القصوى عند النقاط نفسها في الفضاء. وأخيرًا، بعيدًا جدًّا عن الهوائي (الشكل 22-6 ب)، تكون خطوط المجال مستقيمة خلال مساحة واسعة. لذا، تُسَمّى هذه الموجات **موجات مستوية**.

في موجات EM $\vec{\mathbf{E}} \perp \vec{\mathbf{B}} \perp \vec{\mathbf{v}}$

* نتعامل مع موجات تنتقل عبر الفضاء. ليست هناك شحنات كهربائية بحيث تبدأ بها خطوط المجال الكهربائيّ $\vec{\mathbf{E}}$ أو تنتهي. لذلك، تكون عُرى مقفلة. وتشكل خطوط المجال المغناطيسيّ عُرى مقفلة دائمًا.



الشكل 7-22 شدة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية $\vec{E}$ و $\vec{B}$ بزاويا قائمة مع بعضهما. ويتحرك النمط كلّه في اتجاه عمودي على كليهما $\vec{E}$ ، و $\vec{B}$.

إذا كان جهد المصدر يتغيّر بصورةٍ جيبيّة، فإنّ شدّتي المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي سوف تتغيران جيبيًا أيضًا. السلوك الجيبي للموجات موضح في (الشكل 7-22)، والذي يعرف شدة المجال كدالة بالمكان (بدلالة الموضع)على امتداد انتقال الموجة. لاحظ أنّ $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عموديان على بعضهما وعلى اتجاه انتقال الموجة.

نسمّي هذه الموجات كهرومغناطيسية (EM). وهي موجات عرضية لأنّ الاتساع عموديٌّ على اتجاه انتقال الموجة. وعلى أيّ حال، فإنّ الموجات الكهرومغناطيسية دائمًا موجات مجالات، وليست مادية (مثل الموجات في الماء أو الحبل). ولأنهما مجالان، فالموجات الكهرومغناطيسية يمكنها الانتقال في الفراغ.

تنتج موجات EM بواسطة الشحنات الكهربائية المتسارعة

وكما رأينا، تنتج موجات EM بواسطة شحنات مهتزة، لذلك تتسارع. وفي الواقع، نستطيع القول بشكل عام إنّ

الشحنات الكهربائيّة المتسارعة تنتج موجات كهرومغناطيسية.

اشتق مكسويل صيغة لسرعة موجات EM:

c هو رمز خاص بسرعة الضوء.

$$v = c = \frac{E}{B} \qquad \textbf{(2 - 22)}$$

حيث c هو الرمز الخاص بسرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ. أما E، و B فهما مقدارا المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي عند النقطة نفسها في الفضاء. وبشكل خاص، فقد أمكن الاستنتاج أنّ

سرعة موجات EM

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \qquad \textbf{(3 - 22)}$$

عندما عوض مكسويل قيم ϵ_0، μ_0، وجد

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N\cdot m^2})(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{N\cdot s^2/C^2})}}$$
$$= 3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s},$$

والتي تساوي سرعة الضوء المقيسة في الفراغ.

3-22 الضوء كموجة كهرومغناطيسية، والطيف الكهرومغناطيسي

إنّ تنبؤ مكسويل بوجود الموجات الكهرومغناطيسية كان مدهشًا. ومن اللافت للنظر أيضًا السرعة التي تتحرك بها موجات $3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$ تمامًا كالسرعة التي قيست للضوء.

لقد تبيّن أنّ الضوء يتصرف كموجات قبل عمل مكسويل بستين عامًا (سنناقش ذلك في الفصل 24). ولكن لم يدرك أحد نوع هذه الموجات. ما الذي كان يهتز في الموجات الضوئية؟ قال مكسويل إنّ الضوء يجب أن يكون موجات كهرومغناطيسية، معتمدا على السرعة المحسوبة لموجات EM. وأصبحت هذه الفكرة مقبولة لدى العلماء، ولكن ليس بصورة كاملة، إلى أن أمكن الكشف عن موجات EM تجريبيًا. الموجات EM تمّ إنتاجها والكشف عنها تجريبيًا من قبل هاينرش هيرتز (1857-1894) في عام 1887، بعد ثماني سنوات على وفاة مكسويل. استعمل هيرتز جهازًا لتوليد الشرارات عبر فجوة، مولدة موجات كان ترددها نحو 10^{9} هيرتز (Hz). وكشف عنها على مسافة بعيدة باستعمال عروة (حلقة) من سلك حيث تولد منها قوة دافعة كهربائية (emf) عندما عبر خلالها مجال مغناطيسيّ متغير. وقد تبين لاحقًا أنّ هذه الموجات تنتقل بسرعة الضوء $3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$ وتظهر كلّ خصائص الضوء من انعكاس، وانكسار، وتداخل. أما الفرق الوحيد فهو أنها لم تكن مرئية. ولقد كانت تجربة هيرتز سندًا قويًّا لنظرية مكسويل.

تمّ قياس الأطوال الموجيّة للضوء المرئي في العقد الأول من القرن العشرين، قبل أن يتخيّل أحد أنّ الضوء كان موجة كهرومغناطيسية. وقد وجد أنّ الأطوال الموجية تتراوح بين 4.0×10^{-7} m و 7.5×10^{-7} m، أو بين 400 nm و 750 nm ($1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$). ويمكن حساب ترددات الضوء المرئي باستعمال (المعادلة 11-12)، والتي نعيد كتابتها هنا كما يلي:

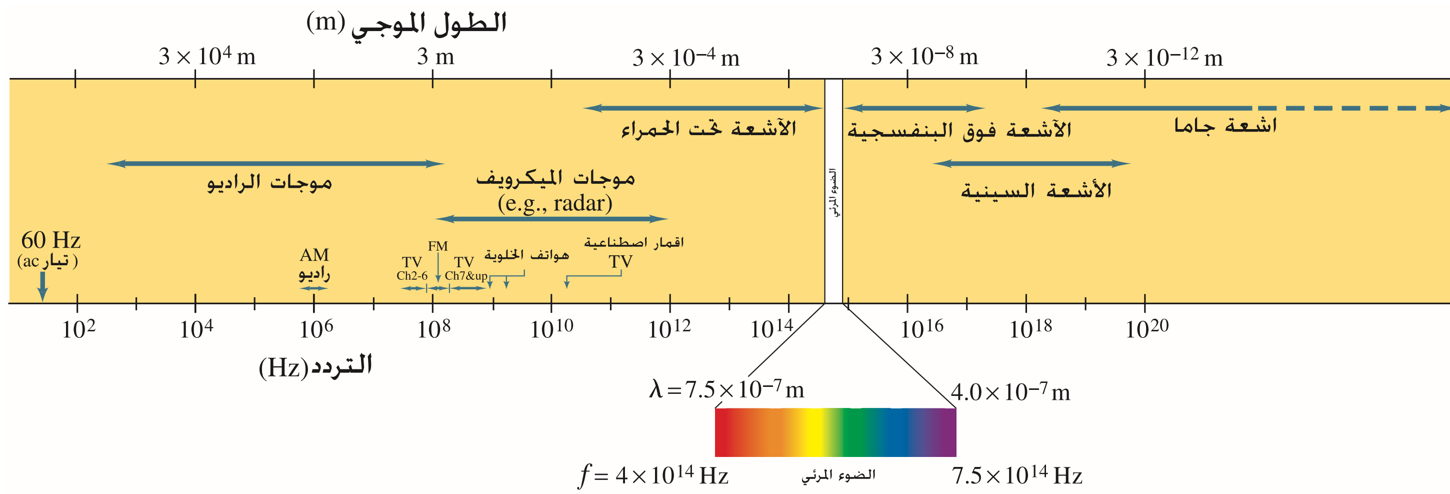
يرتبط طول الموجة والتردد بالسرعة

$$c = \lambda f, \qquad \textbf{(4-22)}$$

حيث f و λ هما التردد وطول الموجة، على الترتيب. أما c فهي سرعة الضوء، 3.00×10^8 m/s، وقد أخذت الرمز الخاص لأنّها تمثّل سرعة الموجات الكهرومغناطيسية كلّها في الفراغ. وتشير (المعادلة 22 - 4) إلى أنّ ترددات الضوء المرئي تتراوح بين 4.0×10^{14} Hz و 7.5×10^{14} Hz (تذكر أنّ 1 Hz يساوي 1 دورة/ ثانية $= 1\ \text{s}^{-1}$).

لكن الضوء المرئي هو فقط أحد أنواع موجات EM. وكما رأينا، فقد أنتج هيرتز موجات EM بترددات صغيرة 10^9 Hz. تُسَمّى هذه الآن **موجات الراديو**؛ لأنّ الترددات في هذا المدى تُستخدم للبثّ الإذاعي والتلفزيوني. الموجات الكهرومغناطيسية، أو إشعاع EM كما نسميه أحيانًا، تم إنتاجها واستقبالها على نطاق واسع من الترددات. وقد صُنِّفت في العادة كما في (الشكل 22 - 8)، الذي يُسَمّى **الطيف الكهرومغناطيسي**.

طيف EM



الشكل 22- 8 الطيف الكهرومغناطيسي.

يمكن توليد موجات الراديو والميكروويف في المختبر باستعمال أجهزة إلكترونية (الشكل 22 - 5). أمّا الموجات ذات التردّد العالي فيصعب توليدها إلكترونيّا. وتنتج هذه الموجات وموجات أخرى EM بعمليّات طبيعية، مثل الانبعاث من الذرات، والجزيئات، والأنوية (المزيد عن هذا لاحقًا). ويمكن إنتاج موجات EM بتسارع الإلكترونات أو جُسيمات مشحونة أخرى، مثل الإلكترونات المتسارعة في هوائي (الشكل 22-5). وهناك مثال آخر هو الأشعة السينية (x) التي تنتج (الفصلان 25 و28)، عندما تتباطأ الإلكترونات السريعة نتيجة اصطدامها بهدف فلزي. حتى أنّ الضوء المرئي المنبعث عن مصباحٍ متوهّجٍ يعود إلى إلكترونات تتسارع داخل فتيل المصباح الحار.

سوف نصادف أنواعًا أخرى من موجات EM. ولكن من الجدير ذكره الآن أنّ الأشعة تحت الحمراء (IR) (موجات EM تردّدها مباشرة أقلّ من تردّد الضوء المرئي) مسؤولة بصورة رئيسة عن الأثر الحراري للشمس. تشع الشمس كميات ملموسة من IR و UV (فوق بنفسجية) وليس الضوء المرئي فقط. إنّ الجزيئات في جلودنا تستجيب للتردّدات تحت الحمراء، ولذلك فهذه هي التي تُمتصّ بصورة رئيسة، وبالتالي تدفئنا. يتعامل الإنسان مع موجات EM بصورة مختلفة تبعًا لأطوالها الموجية؛ فعيوننا تستقبل الموجات بين 4×10^{-7} و 7.5×10^{-7} m (الضوء المرئي)، في حين تكشف جلودنا عن موجات (IR). ولكن هناك كثير من الأطوال الموجية لا نكشفها أبدًا.

تنويه:
موجات الصوت والموجات EM مختلفة تمامًا.

ينتقل الضوء وموجاتٌ كهرومغناطيسيّةٌ أخرى بسرعة $3 \times 10^8\,m/s$. قارن هذا بالصوت، والذي يسير (انظر فصل 12) بسرعة $300\,m/s$ تقريبا في الهواء، أبطأ بمليون مرة؛ أو مقارنة بالسرعة النمطيّة على الخط السريع $30\,m/s$، أي 10 ملايين مرة أبطأ من الضوء. تختلف موجات EM عن موجات الصوت بطريقة مهمة أخرى؛ حيث تنتقل موجات الصوت في وسط كالهواء، ويشمل ذلك حركة جزيئات الهواء. إنّ موجات EM لا تشمل أيّ مادة- فقط مجالات، وتستطيع هذه الانتقال في الفراغ.

المثال 1-22 الأطوال الموجيّة لموجات EM

احسب طول موجة: (أ) EM وترددها 60-Hz، (ب) راديو FM وترددها 93.3-MHz، (ج) شعاع ضوئي أحمر مرئي من ليزر تردده $4.74 \times 10^{14}Hz$.

النّهج: هذه كلّها موجات كهرومغناطيسية. لذا، فإنّ سرعتها $c = 3.00 \times 10^8\,m/s$. ونحلّ لإيجاد λ في (المعادلة 22 - 4): $\lambda = c/f$.

الحلّ: (أ)
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8\,m/s}{60\,s^{-1}} = 5.0 \times 10^6\,m$$

أو 5000 km. 60 Hz هو تردد التّيّار الكهربائيّ في الولايات المتحدة الأمريكية. وكما نرى فإنّ طول موجة واحدة يمتد على طول القارة الأمريكية.

(ب)
$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\,m/s}{93.3 \times 10^6\,s^{-1}} = 3.22\,m$$

طول الهوائي لـ FM نحو نصف موجة $(\frac{1}{2}\lambda)$ أي $1\frac{1}{2}\,m$

(ج)
$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\,m/s}{4.74 \times 10^{14}\,s^{-1}} = 6.33 \times 10^{-7}\,m\ (=633\,nm)$$

التمرين A : ما هي ترددات:(أ) موجة راديو طولها 80-m؟ (ب) موجة أشعة x طولها $5.5 \times 10^{-11}\,m$ ؟

المثال 2-22 خمّن هوائي الهاتف المحمول

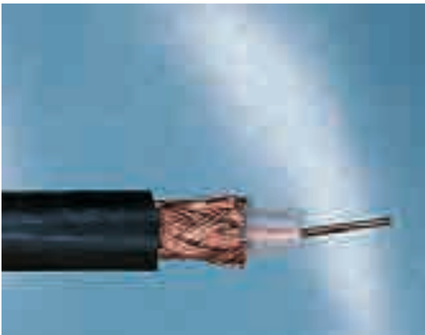
يكون طول هوائي الهاتف المحمول عادةً $\frac{1}{4}$ طول الموجة. طول هوائيٍّ خاصٍّ بهاتفٍ يساوي 8.5-cm. احسب، بالتقريب، التردد الذي يعمل به هذا الهوائي.

النّهج: المعادلة الأساسية التي تجمع سرعة الموجة، والتردد، وطول الموجة هي $c = \lambda f$؛ طول الموجة يساوي أربعة أمثال طول الهاتف.

الحلّ: طول الهوائي $\frac{1}{4}\lambda$ طول الموجة، ولذلك $\lambda = 4(8.5\,cm) = 34\,cm = 0.34\,m$. ثم
$$f = c/\lambda = (3.0 \times 10^8\,m/s)/(0.34\,m) = 8.8 \times 10^8\,Hz = 880\,MHz$$

ملحوظة: هوائيات الراديو ليست موصلات مستقيمة دائمًا. ويمكن للموصل أن يكون عروةً دائريةً لتوفير الحيز. انظر (الشكل 22 - 17ب).

التمرين B: ما طول $\frac{1}{4}$-λ طول موجة هوائي لراديو طائرة يعمل على 165 MHz؟


الشكل 22- 9 كيبل متحد المحور .

يمكن أن تنتقل الموجات الكهرومغناطيسيّة عبر خطوط نقل كانتقالها في الفراغ. عند توصيل مصدر للجهد (emf) بخط نقل- سواء كان من سلكين متوازيين، أو كيبل متحد المحور (الشكل 22-9)- فإنّ المجال الكهربائيّ داخل السلك لا ينشأ فورًا عند كلّ نقاط السلكين. وهذا يعيدنا إلى المناقشة التي عرضناها في (البند 22 - 2) بالعودة (للشكل 22 - 5). في الواقع، يمكن إثبات أنّه إذا كانت الأسلاك مفصولة بالفراغ أو الهواء، فإنّ الإشارة الكهربائيّة تنتقل عبر الأسلاك بسرعة $c = 3.0 \times 10^8\,m/s$ فمثلا، عند تشغيل مفتاح الإنارة، يبدأ الضوء بعد ذلك بجزء صغير من الثانية. إذا كانت الأسلاك موضوعة في وسط سماحيته ϵ الكهربائيّة وقابليته المغناطيسيّة μ (البندان 17 - 8، و 20 – 12 على الترتيب) فإنّ السرعة لا تُعطى (بالمعادلة 22 - 3)، بل بـ
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

المثال 3-22 **خمّن** **سرعة الصوت في الأسلاك**

عندما تتكلم بالهاتف من لوس أنجلوس مع صديق من نيويورك على بعد 4000 km تقريبًا، كم تستغرق الإشارة التي تحمل صوتك لتسير هذه المسافة؟

النّهج: تحمل الإشارة إمّا بسلك هاتف، أو في الهواء عبر الأقمار الصناعية. وفي الحالتين، هي موجات كهرومغناطيسية. الإلكترونيات والأسلاك أيضًا تبطئ الأشياء. ولكن بتقريب بسيط، نأخذ السرعة على أنّها تساوي $c = 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$.

الحل: بما أنّ السرعة = المسافة/الزمن، فإنّ الزمن=المسافة/السرعة= $(4.0 \times 10^6\ \text{m})/(3.0 \times 10^8\ \text{m/s})$ $= 1.3 \times 10^{-2}\text{s}$ أي نحو من $\frac{1}{100}$ s الثانية.

ملحوظة: يمضي مثل هذا الوقت القصير عادة دون انتباه.

التمرين C: لو انتقل صوتك كموجة صوتية، فكم سيستغرق في (المثال 22-3)؟

4-22 قياس سرعة الضوء

حاول جاليليو قياس سرعة الضوء بمحاولة قياس الزمن اللازم للضوء لينتقل بين قمة جبلين. طلب إلى مساعده على قمة جبل وهو نفسه على جبل آخر أن يرفع غطاء مصباح عند رؤيته لضوء المصباح عند جاليليو. قاس جاليليو الوقت، فكان قصيرًا جدًا، فاستنتج أنّ ذلك يتضمن زمن ردّ فعل الإنسان. وعليه، فإنّ سرعة الضوء كبيرة جدًا.

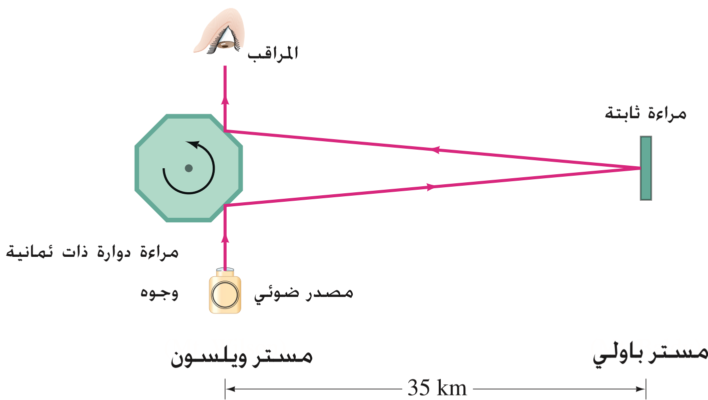
إنّ أول تجربةٍ ناجحة لقياس سرعة الضوء أعطت قيمة محددة لها كانت على يد العالم الهولندي رومر (1644 - 1710). لاحظ رومر أنّ الزمن الدوري الذي تمّ قياسه أيّ 10. لأحد أقمار المشتري كان بقيمة متوسطة 42.5 h، تتغير قليلاً، بالاعتماد على الحركة النسبية بين المشتري والأرض. عندما كانت الأرض تتحرك بعيدًا عن المشتري، كان الزمن الدوري أطول. ولكن عندما كانت الأرض تتحرك نحو المشتري، كان الزمن الدوري أقصر.

اعتبر هذا التغيّر في الزمن الدوري ناجًا من التغير في المسافة بين الأرض والمشتري خلال دورة من دورات قمر المشتري، والزمن الذي استغرقه الضوء للانتقال عبر هذه المسافة. واستنتج رومر أنّ سرعة الضوء محددة، على الرغم من كبرها.

ميكلسون يقيس *C*.

ومنذ ذلك الحين، استُعمِلَت طرق كثيرة لقياس سرعة الضوء. ومن أهم هذه الطرق الطريقة التي استعملها العالم الأمريكي ألبرت ميكلسون (1852 - 1931). استعمل ميكلسون جهاز المرآة الدوارة المرسوم في (الشكل 22-10) لسلسلة من التجارب الدقيقة في الفترة من 1880 إلى 1920. الضوء الناجّ من مصدر ما أُسقط على أحد أوجه مرآة دوّارة ذات ثمانية وجوه. ومن ثمّ انتقل الضوء المنعكس إلى مرآة أخرى على بعد كبير، ثم عاد مرة أخرى كما هو مبيّن. إذا كانت المرآة الدوارة تدور بالمعدل الصحيح، فإنّ الضوء العائد سينعكس من أحد أوجه المرآة إلى تلسكوب ينظر المراقب من خلاله.

الشكل 22- 10. جهاز ميكلسون لقياس سرعة الضوء (الرسم ليس وفق مقياس الرسم)



لو كانت سرعة الدوران مختلفة قليلًا، فإنّ الشعاع سينحرف إلى جانب آخر ولا يلاحظه الشخص الناظر. ومن سرعة دوران المرآة والمسافة المعروفة للمرآة الثانية، يمكن حساب سرعة الضوء. في عام 1920 ثبت ميكلسون المرآة الدوارة على قمة جبل ويلسون في جنوب كاليفورنيا، ومن ثمَّ قاس لاحقًا سرعة الضوء في الفراغ باستخدام أنبوب طويل مفرغ.

هذه الأيام، سرعة الضوء c تؤخذ:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

وتعرف على أنّها تساوي هذه القيمة. وهذا يعني أنّ المعيار للطول، المتر، لم يعد يعرف بصورة منفصلة. بدلا من ذلك، وكما لاحظنا في (البند 1 - 5)، فإنّ المتر يعرف حاليًا بالمسافة التي يقطعها الضوء في 1/299,792,458 في ثانية.

وعادة نقرب c إلى

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

عندما لا نريد نتائج دقيقة جدّا. أما في الهواء، فتكون السرعة أقل قليلا من ذلك.

* 5-22 الطاقة في موجات EM

تحمل الموجات الكهرومغناطيسية طاقة، وتنقلها من منطقة إلى أخرى في الفضاء. هذه الطاقة ترافق المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي المتحركين. لقد رأينا في (البند 17 - 9) أنّ كثافة الطاقة u_E (J/m^3) المختزنة في المجال الكهربائيّ E هي $u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ (المعادلة 17 - 11). وتُعطى كثافة الطاقة المُختزنة في مجال مغناطيسيّ B، كما ناقشنا في (البند 21 - 10)، بـ $u_B = \frac{1}{2}B^2/\mu_0$ (المعادلة 21-10). وهكذا، فإنّ الطاقة الكلية المختزنة لكلِّ وحدة حجم في منطقة من الفضاء حيث توجد موجة كهرومغناطيسية تساوي

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad (5 - 22)$$

في هذه المعادلة، E، و B يمثلان شدتي المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي للموجة عند أيّ لحظة في منطقة ضيقة من الفضاء. ويمكن كتابة (المعادلة 22 - 5) بدلالة المجال الكهربائيّ فقط إذا استعنا بالمعادلتين 22 - 2، $(B = E/c)$ ، و 22 - 3، $(c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ للحصول على

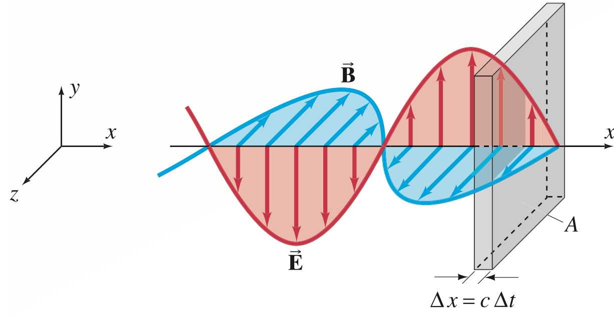
$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{\epsilon_0\mu_0 E^2}{\mu_0} = \epsilon_0 E^2 \qquad (\text{22- 6 أ})$$

لاحظ هنا أنّ كثافة الطاقة المرافقة للمجال المغناطيسيّ B تساوي كثافة الطاقة المرافقة للمجال الكهربائيّ E. ويمكننا كذلك كتابة كثافة الطاقة بدلالة المجال المغناطيسيّ فقط:

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 c^2 B^2 = \frac{B^2}{\mu_0} \qquad (\text{22- 6 ب})$$

أو بحدٍّ واحدٍ يحتوي كلًّا من E، و B

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 EcB = \frac{\epsilon_0 EB}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}\,EB \qquad (\text{22- 6 ج})$$



الشكل 22- 11 موجة كهرومغناطيسية تحمل طاقة عبر المساحة A

إنّ الطاقة التي تنقلها موجةٌ في وحدة الزمن لكلّ وحدة مساحة هي **الشدة** I، كما عرفناها في (البند 11 - 9 و 12 - 2).* وحدات I هي W/m^2. الطاقة التي تعبر مساحة A في فترة زمنية Δt (انظر الشكل 22- 11) هي

$$\Delta U = u\,\Delta V = (u)(A\,\Delta x) = (\epsilon_0 E^2)(Ac\,\Delta t)$$

لأنّ $\Delta x = c\,\Delta t$. لذا، فإنّ مقدار الشدة (طاقة لكلّ وحدة مساحة في كلّ زمن Δt، أو قدرة لكلّ وحدة مساحة) هي

$$I = \frac{\Delta U}{A\,\Delta t} = \frac{(\epsilon_0 E^2)(Ac\,\Delta t)}{A\,\Delta t} = \epsilon_0 c E^2$$

شدة الموجات الكهرومغناطيسية

ومن (المعادلتين 22 - 2 و 22 - 3)، يمكن كتابة هذه المعادلة بالصورة الآتية:

$$I = \epsilon_0 c E^2 = \frac{c}{\mu_0} B^2 = \frac{EB}{\mu_0} \quad \textbf{(7 -22)}$$

(الشدة المتوسطة خلال فترة زمنية كبيرة، إذا كان E و B جيبيين بحيث $\overline{E^2} = E_0^2/2$، تمامًا مثل التيّار الكهربائيّ والجهود، البند 18- 7) تساوي

الشدة المتوسطة

$$\bar{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{\mu_0} B_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} \quad \textbf{(8 -22)}$$

هنا E_0، و B_0 هما القيمتان العظميان للمجالين الكهربائيّ E والمغناطيسي B. وعليه، يمكن كتابة بالصورة التالية:

$$\bar{I} = \frac{E_{\rm rms} B_{\rm rms}}{\mu_0}$$

حيث $E_{\rm rms}$ و $B_{\rm rms}$ هي $(E_{\rm rms} = \sqrt{\overline{E^2}},\ B_{\rm rms} = \sqrt{\overline{B^2}})$

المثال 22-4 E، و B من الشمس

يصل الإشعاع من الشمس الأرض (فوق الغلاف الجوي) بمعدّل يصل $1350\ {\rm J/s\cdot m^2}$ $(=1350\ {\rm W/m^2})$ افرض أنّ هذه موجة EM منفردة. احسب القيم القصوى E، و B.

النّهج: أعطينا الشدة $\bar{I} = 1350\ {\rm J/s\cdot m^2}$. ونحلّ (المعادلة 22-8) $(\bar{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2)$ لإيجاد E_0 بدلالة $\bar{I}$

الحل:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2\bar{I}}{\epsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2(1350\ {\rm J/s\cdot m^2})}{(8.85\times10^{-12}\ {\rm C^2/N\cdot m^2})(3.00\times10^8\ {\rm m/s})}}$$
$$= 1.01\times10^3\ {\rm V/m}.$$

من (المعادلة 22-2)، $B = E/c$، لذلك

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{1.01\times10^3\ {\rm V/m}}{3.00\times10^8\ {\rm m/s}} = 3.37\times10^{-6}\ {\rm T}$$

ملحوظة: على الرغم من أنّ B ذات قيمة صغيرة بالمقارنة مع E (بسبب الطريقة في تعريف الوحدات المختلفة لكلّ من E، و B)، إلا أنّ B يساهم بالطاقة نفسها للموجة تمامًا كما يفعل E. كما رأينا سابقًا.

* تُسمّى الشدّة I لموجة EM عادةً باسم **متجه بوينتنغ**، وتُعطى الرمز $\vec{S}$. إنّ اتجاهها هو تمامًا الاتجاه الذي تنقل فيه الطاقة، وهو اتجاه انتقال الموجة، ومقدارها هو الشدة $(S = I)$.

* 6-22 نقل الزّخم وضغط الاشعاع

إذا كانت الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة، فمن الممكن التوقع بأنّها تحمل زخمًا خطيًّا أيضًا. عندما تصدم موجة كهرومغناطيسية سطح جسم، فتمتص أو تنعكس، فإنّ قوة سوف تؤثر في السطح كنتيجة لنقل الزخم ($F = \Delta p / \Delta t$) تمامًا مثلما يصدم جسم متحرك سطحًا ما. تُسَمّى القوة لكلّ وحدة مساحة الناتجة من الموجات **ضغطَ الاشعاع**، وقد أثبت وجوده العالِم مكسويل، الذي بين أنّه إذا تم امتصاص إشعاع EM (ضوء، مثلا) بواسطة جسم، فإنّ الزخم المنقول يساوي

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} \qquad \text{[الإشعاع المتص]} \qquad \text{(22-9 أ)}$$

حيث ΔU هي الطاقة المتصّة بواسطة الجسم في الفترة Δt، أمّا c فهي سرعة الضوء. ولكن إذا انعكس الضوء، (افرض أنّ الجسم مرآة) فإنّ الزخم المنقول يساوي ضعف الزخم المذكور سابقًا، كارتداد كرة ارتدادًا مرنا عن السطح

$$\Delta p = \frac{2\Delta U}{c} \qquad \text{[الإشعاع المنعكس]} \qquad \text{(22-9 ب)}$$

إذا امتصَّ السطح بعض الإشعاع، وعكس بعضه الآخر، عندها $\Delta p = a\, \Delta U / c$، حيث α تأخذ قيمة بين 1 و 2.

وباستعمال قانون نيوتن الثاني، يمكننا حساب القوة والضغط الناجّين من إشعاع EM على جسم. تعطى القوة F بـ $F = \dfrac{\Delta p}{\Delta t}$

يُعطى ضغط الإشعاع p (نفرض الامتصاص الكامل) بـ انظر (المعادلة 22-9 أ)

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1}{Ac}\frac{\Delta U}{\Delta t}$$

وقد ناقشنا في (البند 22-5) أنّ الشدة المتوسطة $\overline{I}$ تعرف بأنها الطاقة لكلّ وحدة مساحة

$$\overline{I} = \frac{\Delta U}{A\, \Delta t}$$

لذا، فإنّ ضغط الإشعاع هو

$$P = \frac{\overline{I}}{c} \qquad \text{(22-10أ)} \qquad \text{ضغط الاشعاع (امتُصَّ)}$$

وإذا انعكس الإشعاع كاملا، فإنّ الضغط يساوي ضعف هذه الكمية

$$P = \frac{2\overline{I}}{c} \qquad \text{(22-10ب)} \qquad \text{ضغط الإشعاع (انعكس).}$$

المثال 22-5 خمّن ضغط الإشعاع الشّمسيّ

إنّ الاشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض (بعد مروره بالغلاف الجوي الأرضي) ينقل الطاقة بمعدل $1000\ \mathrm{W/m^2}$ تقريبا. احسب، بالتقريب، الضغط والقوة التي تؤثر بها الشمس في يدك الممدودة.

النّهج: ينعكس جزء من الإشعاع، أما الجزء الآخر فيُمتص. لذا، دعنا نقدر ببساطة $P = \overline{I}/c$

الحل:

$$P \approx \frac{\overline{I}}{c} = \frac{1000\ \mathrm{W/m^2}}{3 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}} \approx 3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2}$$

تقريب لمساحة يدك الممدودة قد تكون نحو 10 cm في 20 cm، إذن $A = 0.02\ \mathrm{m^2}$. وعليه، فإنّ القوة هي

$$F = PA \approx (3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2})(0.02\ \mathrm{m^2}) \approx 6 \times 10^{-8}\ \mathrm{N}$$

ملحوظة: هذه أرقام متناهية الصغر. إنّ قوة الجاذبية على يدك، للمقارنة، هي نصف باوند تقريبًا، أو باعتبار $m = 0.2\ \mathrm{kg},\ mg \approx (0.2\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2}) \approx 2\ \mathrm{N}$. أي أنّ ضغط الإشعاع على يدك ضئيل مقارنة بالجاذبية.

تطبيق الفيزياء
الملاقط الضوئية

على الرغم من عدم شعورك بآثار ضغط الإشعاع مباشرةً، فإنّ الظاهرة تكون لافتةً للنظر عندما تطبّق على الذرّات المشعّعة بشعاعٍ مُركّزٍ من ليزر. كتلة الذرة نحو 10^{-27} kg والليزر يمكن أن يعطي طاقة بمعدّل $1000\ W/m^2$. هذه هي الشدة التي استعملت في (المثال 22 - 5) سابقًا. ولكن، يصبح ضغط إشعاع بقيمة $10^{-6}\ N/m^2$ مهما على جزيء كتلته بين 10^{-23}، و 10^{-26} kg. ويمكن تحريك الذرات والجزيئات بواسطة توجيهها بشعاع ليزر في أجهزة تُسَمّى "ملاقط ضوئية". ولهذه الملاقط بعض التطبيقات المهمّة. فهي مهمّة جدًّا للبيولوجيين، وخاصةً أنّها يمكن أن تتعامل مع الأعضاء المجهرية ومركبات الخليّة دون إتلافها. وقد تم استعمال هذه الملاقط الضوئية في قياس خصائص المرونة لـ DNA عن طريق سحب كلّ طرف من الجزيء بواسطة ملقط ليزري.

* 7-22 المذياع والتلفزيون؛ الاتصالات اللاسلكية

تطبيق الفيزياء
الإرسال اللاسلكي

تُقَدِّمُ الموجاتُ الكهرومغناطيسيّةُ إمكانيّةَ نقلِ المعلوماتِ إلى مسافاتٍ بعيدة. ومن بين الأوائل الذين أدركوا ذلك، ووضعوها موضع التطبيق كان ماركوني (1874-1937)، الذي اخترع المذياع، وطور التلغراف اللاسلكي في نهاية القرن التاسع عشر. وبذلك أمكن إرسال الرسائل بسرعة الضوء دون استعمال الأسلاك. لقد كانت أولى الإشارات نبضاتٍ طويلةً وقصيرةً، يمكن ترجمتها إلى كلمات بواسطة الشيفرة، مثل "النقاط" و "الشرطات" في شيفرة موريس؛ كانت أرقامًا دون أسلاك. صدّق أو لا تصدّق. في عام 1895 أرسل ماركوني إشارات لا سلكيّة إلى مسافة كيلومتر أو اثنين. وبحلول عام 1901 أرسل إشارات تجريبية إلى مسافة 3000 km عبر المحيط من نيوفاوندلاند (كندا) إلى كورنوال، إنجلترا. وفي عام 1903 بعث أوّل الرسائل التجارية من "كيب كود"، ماتشوستس، إلى إنجلترا. كما أنّ صحيفة التايمز اللندنية طبعت مواضيع إخبارية عن طريق مراسلها في نيويورك. وفي العام نفسه كانت أول محاولة طيران للأخوين رايت.

إرسال موجات المذياع

بصمات العصر الحديث- اتصال لاسلكي وطيران- تؤرّخ في العام نفسه.

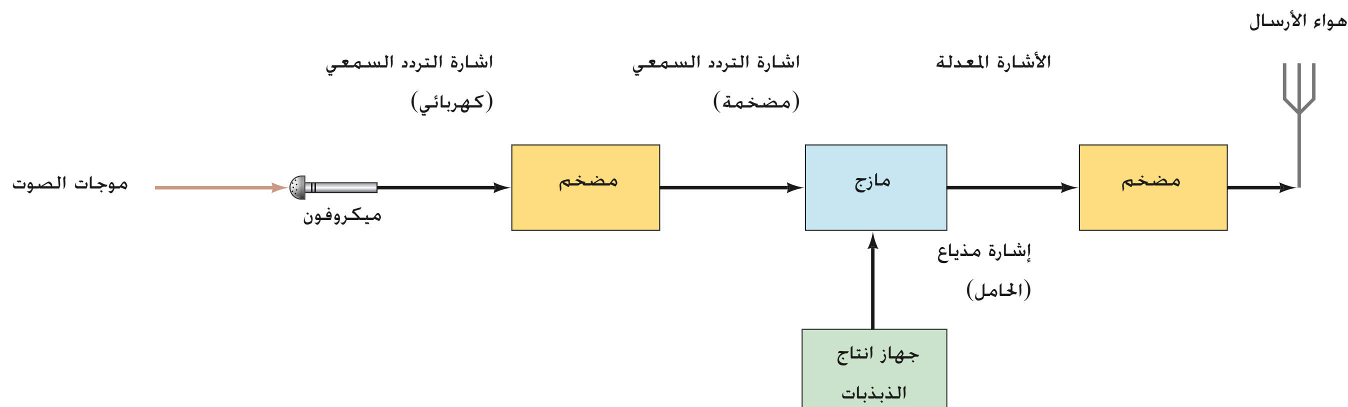
أما العقد التالي، فقد شهد تطور أنابيب التفريغ. ومن هذا العمل المبكر اخترع المذياع والتلفزيون. وسنناقش الآن باختصار كيفية انتقال إشارات المذياع والتلفزيون، وكيفية استقبالها في البيوت.

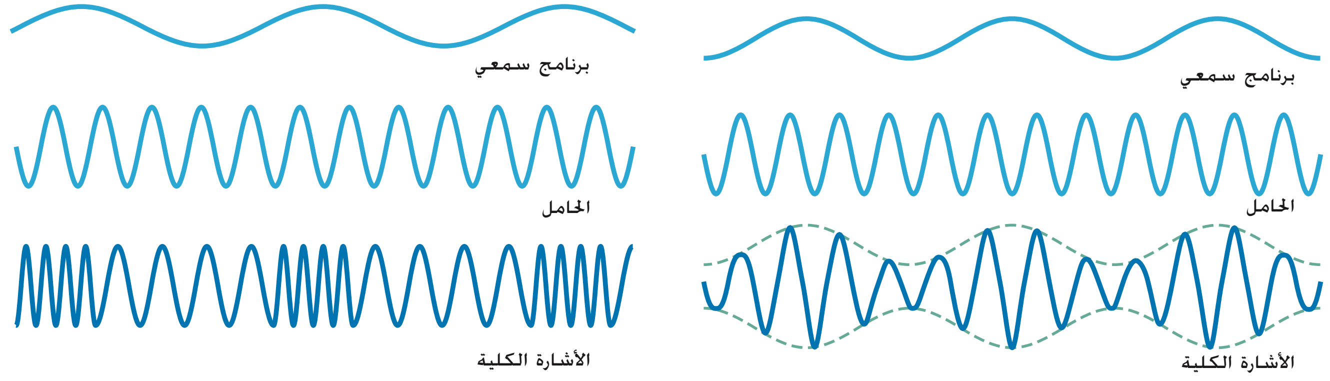
عملية البث الإذاعي للمعلومات (كلمات وموسيقى) مبينة في (الشكل 22 - 12). تُحَوَّل المعلومات الصوتية إلى إشارة كهربائية بالترددات نفسها، بواسطة ميكروفون أو رأس تسجيل. تُسَمّى هذه الإشارة إشارة التردد السمعي (AF) لأنّ الترددات في مدى الصوت (20 إلى 20,000 Hz). تكبر الإشارات إلكترونيّا، ثم تمزج بإشارة مذياع (RF) تُسَمّى تردد الناقل (الحامل) الذي يمثل تلك المحطة الإذاعية. محطات مذياع (AM) لها تردد حامل من نحو 530 kHz إلى 1700 kHz، مثلا "710" على قرص المذياع تعني محطة إذاعية ترددها 710 kHz. أما محطات "FM" فلها ترددات حمل أكبر بكثير، بين 88 MHz و 108 MHz.

تردد الناقل

إنّ ترددات الحمل لمحطات TV في الولايات المتحدة الأمريكية، تقع بين 54 MHz و 88 MHz، ثم بين 174 MHz و 216 MHz، وكذلك بين 470 MHz و 890 MHz.

الشكل 22- 12 مخطط جهاز إرسال مذياع





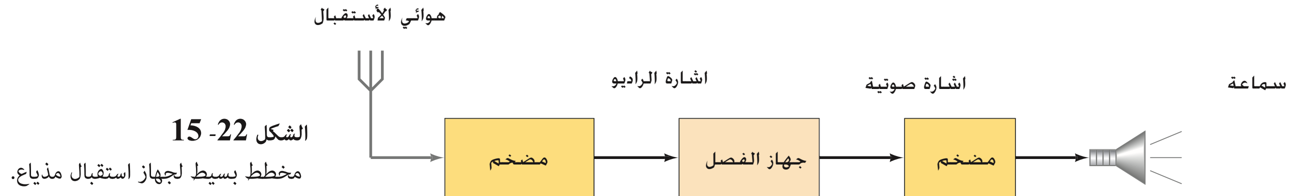
الشكل 22- 13 في تعديل (مزج) الاتساع (AM)، الاتساع للإشارة الحاملة يعمل بحيث يتغير بالتناسب مع اتساع الموجة الصوتية.

الشكل 22- 14 في تعديل (مزج) التردد (FM) يتغير تردد الموجة الحاملة بالتناسب مع تردد موجة الصوت. يستعمل هذا الأسلوب في محطات FMللمذياع والتلفزيون.

تطبيق الفيزياء
FM و *AM*

لقد تمّ مزج التردّدات الصوتية والحاملة بطريقتين هما:أ- تعديل الاتساع (AM). وفيها يتغير اتساع الموجة الحاملة (ذات التردد العالي) بحيث يتناسب مع اتساع الموجة الصوتية. كما هو مبين في (الشكل 22 - 13). ويُسَمّى تعديل الاتساع لأنّ اتساع الموجة الحاملة يتغيّر (يتعدّل). ب- تعديل التردّد (FM). وفيها يتغيّر تردّد الموجة الحاملة بحيث يتناسب مع اتساع موجة الصوت. كما هو مبيّن في (الشكل 22 -14). يتمّ تكبير الإشارة المعدّلة ثمّ تُرسل إلى هوائي الإرسال. حيث يُبثّ المزيج المعقّد من الترددات على صورة موجات كهرومغناطيسيّة.

يعمل جهاز البثّ التلفزيوني بصورة مشابهة. حيث يستعمل FM للصوت. و AM للصورة (فيديو)؛ إشارتا الصوت والصورة (انظر البند 17-10) تمزجان بترددات حاملة.

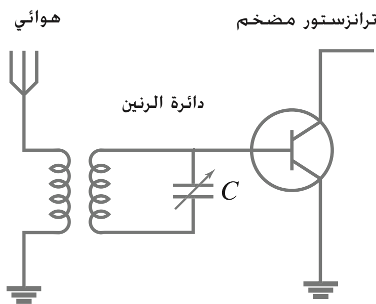


الشكل 22- 15
مخطط بسيط لجهاز استقبال مذياع.

تطبيق الفيزياء
جهازا استقبال مذياع وتلفزيون(*TV*).

دعنا الآن ننظر إلى الطرف الآخر من العملية. ألا وهو استقبال برامج المذياع والتلفزيون في البيت. جهاز استقبال مذياع بسيط موضّح في مخطّط (الشكل 22-15). يتمّ استقبال موجات *EM* المنبعثة من كلّ محطات المذياع بواسطة الهوائي، وتكون الإشارة التي يلتقطها الهوائي ضعيفة، وتحتوي على تردّدات كثيرة من محطّات متعدّدة. يختار المستقبل تردد مذياع *RF* معينًا (في الواقع مدى ضيّقًا من الترددات) بفحص محطة معينة باستعمال دارة رنين *LC* (البند 21-14). وهناك طريقة بسيطة لتوليف محطة معينة مبينة في (الشكل 22 - 16). يتم توليف محطة معينة "بواسطة تغير *C* أو *L*. بحيث يصبح تردد الرنين متفقًا مع تردد الناقل (الحامل) لحظة الإرسال. ومن ثمّ تذهب هذه الإشارة "الحاملة " و"الصوتية " إلى الجزء الخاص بفصل الموجتين (الشكل 22 - 15). حيث "الفصل" يعني أنّ الموجة الحاملة تنفصل عن الموجة المحمولة (الصوتية). وأخيرا، تكبر الإشارة الصوتية وترسل إلى السماعات.

الشكل 22- 16.
دارة توليف بسيطة للمذياع.



تحتوي أجهزة الاستقبال الحديثة على مراحل أكثر من تلك المعروضة. وهناك طرق عدّة تُستعمل لزيادة الحساسية والانتقائية (القدرة على الكشف عن إشارات ضعيفة وتمييزها من محطات أخرى). وتقليل التشويه في الإشارة الأصلية*.

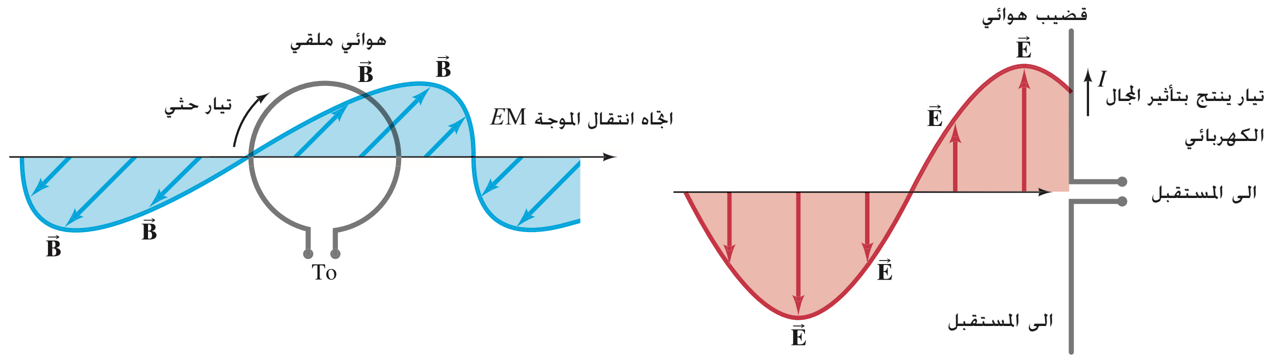
* البث الإذاعي من نوع FM. تحمل الموجة الحاملة إشارتين: تحتوي الإشارة الأولى على ترددات حتى 15 kHz. والتي تحتوي الترددات الصوتية كلّها. في حين تحتوي الإشارة الثانية على المدى نفسه من الترددات. ولكن يضاف إليها إشارة 19 kHz. يطرح جهاز استقبال ستيريو هذه الإشارة 19,000-Hz. ثم يوزع الإشارتين إلى القناتين اليمنى واليسرى. تتكون الإشارة الأولى من جمع الإشارتين اليمنى واليسرى (L + R). وكذلك المذياع الأحادي يكشف عن الصوت كلّه. أمّا الإشارة الثانية فهي الفرق بين اليسار واليمين (L - R). كذلك على الجهاز أن يجمع الإشارتين ويطرحهما للحصول على يسرى نقية. وأخرى نقية يمنى لكلّ قناة.

التلفزيون

يقوم جهاز الاستقبال التلفزيوني بعمل أشياء مشابهة لكلتا الإشارتين الصوتيّة والمرئيّة. تذهب الإشارة الصوتية أخيرًا إلى السماعات. أمّا المرئية فتذهب إلى جهاز العرض كأنبوب الأشعة المهبطيّة (CRT) أو شاشة LCD. (البندان 17- 10 و 24- 11).

صحن هوائي للأقمار الصناعية

يتكوّن أحد أنواع الهوائيات من قضيب موصل للكهرباء أو أكثر. يؤثر المجال الكهربائيّ في موجات EM بقوة في إلكترونات الموصل ممّا يؤدي إلى تحركها ذهابًا وإيابًا بتردّدٍ يساوي تردّد الموجات (الشكل 22- 17أ). وهناك نوعٌ آخر من الهوائيّات مؤلّفٍ من ملفٍّ أنبوبيٍّ من الأسلاك يكشف عن المجالات المغناطيسيّة للموجات: المجال المغناطيسيّ B المتغير بحيث يحرض قوة دافعة كهربائية في الملفّ (الشكل 22- 17ب). ويتكوّن صحن القمر الصناعي، (الشكل 22- 18)، من عاكس قطع مكافئ يجمع الموجات الكهرومغناطيسية على "البوق". ويشبه بذلك تلسكوب المرآة المقعرة. (الشكل 25- 21)



الشكل 22- 17 الهوائيات. (أ) المجال الكهربائيّ لموجات EM ينتج تيّارا في الهوائي المكون من أسلاك مستقيمة أو قضبان. (ب) المجال المغناطيسيّ المتغير يحث قوة دافعة كهربائية (emf) وتيارًا في الهوائي الحلقي.

الشكل 22- 18
طبق الأقمار اللاقط



المثال 22-6 توليف محطة

احسب طول الموجة المنبعثة من مذياع FM يبث على 100 MHz.

النّهج: تبث موجات الراديو كموجة FM. لذا، فإنّ سرعتها $c = 3.0 \times 10^8\,\text{m/s}$. ونجد طول الموجة من (معادلة 22 - 4)، $\lambda = c/f$.

الحلّ: تردد الموجة الحاملة $f = 100\,\text{MHz} = 1.0 \times 10^8\,\text{s}^{-1}$، لذلك

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})}{(1.0 \times 10^8\,\text{s}^{-1})} = 3.0\,\text{m}$$

ملحوظة: الأطوال الموجيّة لإشارات FM الأخرى (88 MHz إلى 108 MHz) قريبة من هذه القيمة 3.0-m لهذه المحطّة. هوائيات FM طولها النموذجي 1.5 m، أو نصف طول الموجة تقريبًا. يُختار هذا الطول بحيث يستجيب الهوائي بهيئة رنين، ولذلك يكون حسّاسًا أكثر لموجات FM. ويجب أن تكون هوائيات مذياع AM أطول بكثير لتساوي $\frac{1}{2}\lambda$ أو $\frac{1}{4}\lambda$.

اتصالات موجات EM أخرى

تطبيق الفيزياء

الهواتف المحمولة، التحكم بالمذياع، التحكم عن بعد، تلفزيون الكيبل، وتلفزيون الأقمار والمذياع.

تخصّص المناطق المختلفة لطيف موجات الراديو من هيئات حكومية لأغراض متعدّدة. بجانب ما ذكر أعلاه، هناك "نطاقات" مخصّصة لاستعمال السفن، والطائرات، والشرطة، والجيش، والهواة، والأقمار الصناعيّة، والفضاء، والرادار. إنّ أجهزة الهواتف المحمولة مثلا، هي أجهزة مذياع مرسلة ومستقبلة كاملة. وتعمل في الولايات المتحدة في نطاقين مختلفين هما: 800 MHz، و 1900 MHz (= 1.9 GHz). أما في أوروبا وآسيا فهما: 900-MHz و 1800-MHz وتستخدم في نظام دولي يُسَمّى GSM نظام الاتصالات العالمي للهواتف المحمولة (Communication Global system for Mobile). أمّا الألعاب التي يتحكم بها بواسطة موجات المذياع (سيارات، قوارب، لعب حيوانات آلية(روبوت)، وغيرها) فتستعمل ترددات تتراوح من 27 MHz إلى 75 MHz. ويمكن أن يعمل جهاز التحكم في السيارة عن بعد (دون مفاتيح) على نحو 300 MHz أو 400 MHz.

تحمل قنوات التلفزيون بالكيبل كموجات كهرومغناطيسيّة على طول كيبل متحد المحور (انظر الشكل 22- 9) بدلاً من إرسالها وإعادة استقبالها في الهواء. القنوات ضمن الجزء نفسه من طيف EM، مئات MHz، ولكن بعضها على ترددات ليست متوافرة للبث التلفزيوني. التلفزيون الرقمي بالأقمار والراديو تحمل في قسم الميكروويف من الطيف (12 GHz إلى 14، و 2.3 GHz على الترتيب).

ملخص

ابتكر مكسويل نظريةً رائعةً يمكن من خلالها وصف المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية باستعمال أربع معادلات. تُسَمّى الآن "**معادلات مكسويل**". تعتمد هذه المعادلات على أفكار سابقة. لكن مكسويل أضاف معادلة تنصّ على أنّ المجال الكهربائيّ المتغير يُنتج مجالاً مغناطيسيًّا .

توصلت نظريّة مكسويل إلى أنّه يمكن الحصول على موجات **عرضية كهرومغناطيسية** (EM) بتسارع شحنات كهربائية. وهذه الموجات تنقل عبر الفضاء بسرعة الضوء وتعطى بالعلاقة

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \qquad \textbf{(3-22)}$$

المجالان: الكهربائيّ والمغناطيسي في موجة EM متعامدان وعموديّان على اتّجاه انتقال الموجة. هذه الموجات هي موجات مجالات وليست موجات مادية. ويمكن أن تنتقل في الفراغ.

طول الموجة λ والتردد f لموجة EM ترتبط بسرعتها c حيث

$$c = \lambda f \qquad \textbf{(4-22)}$$

تمامًا كالموجات الأخرى.

لقد أصبحت فكرة أنّ الضوء هو موجة EM (بتردد عال جدًّا) مقبولة إلى حدٍّ ما بعد الكشف عن موجات EM بالتجربة. يتضمّن الطيف الكهرومغناطيسي موجات EM بتشكيلة عريضة من الموجات. من المرئي والأشعة X وأشعة جاما. وكلّها تسير في الفضاء بسرعة. $c = 3.0 \times 10^8\,\text{m/s}$.

* [الشدة المتوسطة (W/m^2) لموجة EM هي

$$\bar{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{\mu_0}B_0^2 = \frac{1}{2}\frac{E_0 B_0}{\mu_0} \qquad \textbf{(8-22)}$$

حيث E_o و B_o هي القيمة القصوى لكلٍّ من المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية على الترتيب. في الموجة.]

*[موجات EM تحمل زخمًا وتؤثّر بضغط إشعاع يتناسب مع الشدة I للموجة.]

أسئلة

1. يتحرّك المجال الكهربائيّ في موجة EM نحو الشمال يهتزُّ في مستوى شرق - غرب. صف اتّجاه المجال المغناطيسيّ في هذه الموجة.

2. هل الصوت موجة كهرومغناطيسية؟ إذا كان الجواب بالنفي. فأي نوع من الموجات هو؟

3. هل تستطيع موجات EM أن تنتقل خلال فراغ تام؟ هل تستطيع موجات الصوت عمل ذلك؟

4. عندما تدير مفتاح مصباح الإضاءة ليعمل. فهل ينتشر الضوء مباشرة؟ فسِّر.

5. هل الأطوال الموجية للمذياع والتلفزيون أطول من الموجات التي تراها العين. أم أقصر؟

6. عندما تصل سماعتين مع مخرج الصوت (output) لمكبر ستيريو. هل عليك التأكّد بأنّ أسلاك التوصيل متساوية في الطول بحيث لا يكون هناك تأخير زمني بين السماعتين؟ فسِّر.

7. في الطيف الكهرومغناطيسي. ما نوع موجة EM التي طولها 10^3 km؟ 1 km؟ 1 m؟ 1 cm؟ 1 mm؟ 1 μm؟

8. هل يمكن لموجات المذياع أن يكون لها تردّدات موجات الصوت نفسها (20 Hz–20,000 Hz)؟

* **9.** هل تستطيع محطتا مذياع أو TV الإرسال على تردد الحامل نفسه؟ علّل.

* **10.** إذا كان لمحطة إرسال مذياع هوائيّ عموديّ. فهل يجب أن يكون لجهاز الاستقبال هوائي (نوع القضيب الموصل) عمودي أو أفقي للحصول على أفضل استقبال؟

* **11.** ترددات الحامل لإذاعة FM أكبر بكثير من إذاعة AM. اعتمادًا على ما تعلمته عن الحيود في (الفصل 11). فسِّر لماذا يمكن الكشف عن موجات AM بصورة أيسر خلف الجبال أو النباتات؟

* **12.** ناقش كيف تستعمل الهواتف اللاسلكية موجات EM. ماذا عن الهواتف المحمولة؟

* **13.** قد يقوم شخص تائه بإعطاء إشارة فلاش (وميض) باستعمال شيفرة مورس. وهذه في الواقع موجة EM معدّلة: هل هي AM أم FM؟ ما هو تردد الحامل. بالتقريب؟

مسائل

22- 1 تغير $\vec{E}$ ينتج $\vec{B}$

* **1.** (II) في لحظةٍ ما. يتدفّق تيّارٌ شدّتُهُ 1.8-A في أسلاك متصلة بمواسع كهربائيٍّ متوازي اللوحين. ما معدل تغيّر المجال الكهربائيّ بين اللوحين إذا كانا مربعين. وطول ضلع المربع 1.60 cm؟

* **2.** (II) مواسع 1200-nF. لوحاه دائريّان. قطر كلٍّ منهما 2.0 cm. ويجمع شحنات بمعدّل 35.0 mC/s عند لحظة ما. ماذا سيكون مقدار المجال المغناطيسيّ التأثيري على بعد 10.0 cm من مركز اللوحين؟ ماذا سيكون مقدار المجال بعد أن يشحن المكثف بصورة كاملة؟

22- 2 موجات EM

3. (I) إذا كان للمجال المغناطيسيّ في موجة EM قيمة قصوى 17.5 nT عند نقطة معينة. فما أقصى قيمة للمجال الكهربائيّ؟

4. (I) في موجة EM تنتقل غربًا. يهتز المجال المغناطيسيّ عموديا بتردد 80.0 kHz. وشدة 6.75×10^{-9} T. ما تردد rms وشدته للمجال الكهربائيّ؟ وما اتّجاهه؟ [مساعدة: انظر الشكل 22 - 7].

22- 3 و 22- 4 طيف EM والسرعة

5. (I) ما تردد موجة ميكروويف طولها 1.60 cm؟

6. (I) ما طول موجة رادار ترددها 29.75×10^9 Hz ؟

7. (I) موجة EM ترددها 9.66×10^{14} Hz. ما طول موجتها؟ وكيف تصنفها؟

8. (I) موجة EM طولها 650 nm. ما ترددها؟ وكيف تصنفها؟

9. (I) كم يستغرق الضوء ليصلنا من الشمس التي تبعد عنّا 1.50×10^8 km؟

10. (I) موجةٌ قصيرةٌ واسعةُ الانتشار لمذياعٍ، تُعرف بـ نطاق 49-m. ما تردد إشارة 49-m؟

11. (I) أقرب نجم إلينا (عدا الشمس) يبعد عنّا 4.2 سنة ضوئيّة. أي أنّ الضوء الذي يشعُّهُ يستغرق 4.2 سنة للوصول إلينا. كم يبعد النجم عنا بالأمتار؟

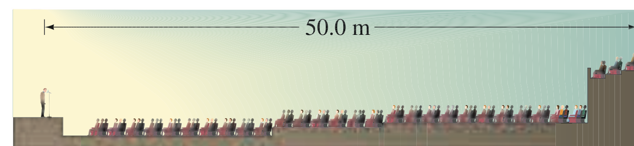
12. (I) السنة الضوئية هي وحدة مسافة (وليست للزمن). كم مترًا يسير الضوء في سنة؟

13. (II) كم الزمن الذي تستغرقه رسالة على صورة موجات مذياع من الأرض للوصول إلى المريخ عندما يكون: (أ) في أقرب مكان من الأرض؟ (ب) في أبعد مكان عن الأرض؟ [مساعدة: انظر الجدول 5 - 2 صفحة 125].

14. (II) ما أقلُّ سرعة زاوية كان على مرآة ميكلسون ذات الثمانية وجوه، أن تدور بها بالأوجه المتتابعة للمرآة (الشكل 22 - 10)؟

15. (II) يريد طالب ضبطَ أبعاد تجربة ميكلسون لقياس سرعة الضوء بحيث تتلاءم مع غرفته. تتوافر مرآة ذات ستة وجوه، ويجب وضع المرآة الثانية على بعد 12 m من المرآة الدوارة. فيما عدا ذلك، فإنّ الترتيب هو نفسه في (الشكل 22 - 10). ما أقل معدل يجب أن تدور به المرآة؟

16. (II) من سيسمع صوت المغني أولاً: شخص يبعد عنه 50.0 m (الشكل 22-19) أم شخص في بيته على بعد 3000 km بجانب المذياع؟ كم الفرق في الزمن؟ افرض أنّ الميكروفون على بعد سنتيمترات من المغني، وأنّ درجة الحرارة 20°C.



الشكل 22- 19 (مسألة 16).

17. (II) تنتج الليزرات الومضية المستعملة في العلوم والطب ومضات قصيرة من الموجات الكهرومغناطيسية. إذا كان طول موجة الليزر 1062 nm (هذا ناتج من نيوديميوم - ياغ ليزر) وتدوم النبضة 32 بيكوثانية، كم موجة موجودة في النبضة الضوئية؟ ما مدى قصر النبضة لتتواءم مع طول موجة واحدة؟

* 22-5 الطاقة في موجات EM

* **18.** (I) في موجة EM، لشدّة المجال الكهربائيّ $\vec{E}$ في الفراغ قيمة قصوى 21.8 mV/m. ما متوسط معدّل التغير الذي تحمل فيه هذه الموجة الطاقة لكلّ وحدة مساحة لكلّ وحدة زمن؟

* **19.** (II) في موجة EM متنقلة، شدة المجال المغناطيسيّ (rms) تساوي 28.5 nT. ما الزمن اللازم كي تنقل 235 J من الطاقة إلى $100\ cm^2$ من جدار تصطدم به عموديا؟

* **20.** (II). ما مقدار الطاقة المنقولة عبر مساحة $1.00\text{-}cm^2$ في الساعة بواسطة موجة EM مجالها الكهربائيّ E، وقيمة rms لها تساوي 38.6 mV/m ؟

* **21.** (II) تنتشر موجة EM كرويًّا من مصدر قدرته 1200-W. على بعد 10.0 m. ما متوسّط الشدّة I؟ وما قيمة rms للمجال الكهربائيّ؟

* **22.** (II) ليزر قدرته 12.8 mW، يُصدر حزمةً ضوئيّةً قطرها 1.75 mm. ما القيم المتوسطة (rms) للمجالين E، و B للشعاع؟

* **23.** (II) احسب بالتقريب القدرة المتوسطة للشمس علمًا أنّ نحو $1350\ W/m^2$ تصل الغلاف الجوي للأرض.

* **24.** (II) إذا كان مقدار المجال B لموجة EM هو 2.5×10^{-7} T: (أ) ما اتساع المجال E؟ (ب) ما مقدار القدرة المتوسطة لكلّ وحدة مساحة لموجة EM؟

* **25.** (II) يصدر ليزر ذو طاقة عالية نبضة طولها 1.0-ns، وقدرتها المتوسطة 2.8×10^{11} W. نصف قطر الحزمة الضوئية 2.2×10^{-3} m. احسب: (أ) الطاقة الناتجة في كلّ نبضة. (ب) قيمة rms للمجال الكهربائيّ.

* 22-6 ضغط الإشعاع

* **26.** (II) احسب، بالتقريب، ضغط الإشعاع الناتج من مصباح 100-W على بعد 8.0 cm من مركز المصباح. احسب القوة المؤثرة في رأس إصبعك إذا وضعته عند تلك النقطة.

* 22-7 المذياع والتلفزيون

* **27.** (I) ما مدى الأطوال الموجية لكلّ من:
(أ) مذياع FM (88 MHz إلى 108 MHz) ؟
(ب) مذياع AM (535 kHz إلى 1700 kHz)؟

* **28.** (I) احسب، بالتقريب، طول الموجة في هاتف محمول تردّده 1.9 GHz.

* **29.** (I) قارن 940 على قرص AM بـ 94 على قرص FM. وأيهما له طول موجة أكبر؟ وبأي نسبة أكبر؟

* **30.** (I) ما الأطوال الموجية لقناتي TV تبث على 54.0 MHz (القناة 2)، و 806 MHz (قناة 69)؟

* **31.** (I) المكثّف المتغيّر في منغّم AM (tuner) مذياع مواسعته 2800 pF عندما يستقبل المذياع نغمة ترددها 550 kHz. كم يجب أن تكون مواسعة المكثف لنغمة 1610 kHz؟

* **32.** (I) الدارة المهتزة لمحطة FM ترددها 96.1-MHz معامل الحثّ الذاتيّ لها (L) $1.8\ \mu H$. كم يجب أن تكون سعة المكثف؟

* **33.** (II) لدارة توليف FM مذياع مواسع ثابت، وسعته $C = 840$ pF. يتم التوليف عن طريق تغير المحاثة (L). ما المدى الذي يجب أن تكون عليه L بحيث يتم توليف محطات تردداتها بين 88 MHz و 108 MHz؟

* **34.** (II) يريد هاوٍ صُنْعَ مذياعٍ، يمكن أن يستقبل المدى 14.0 MHz إلى 15.0 MHz. مواسع متغير أقل سعة له 82 pF. (أ) ما القيمة المطلوبة للمحاثة (L)؟ (ب) ما أكبر سعة للمواسع المستعمل؟

* **35.** (II) يوجه قمر صناعي إشعاع ميكروويف قدرته 10 kW نحو سطح الأرض، على بعد 550 km. عندما يصطدم الشعاع بالأرض قطره نحو 1500 m. جد قيمة المجال الكهربائيّ rms للشعاع.

* **36.** (III). هوائي FM طوله 1.60-m، تم توجيهه موازيا للمجال الكهربائيّ لموجة EM. ما قيمة المجال الكهربائيّ بحيث يُنتج (rms) 1.00-mV بين طرفي الهوائي؟ ما معدّل نقل الطاقة لكلّ مترٍ مربّع؟

مسائل عامة

37. إذا كان على الشمس أن تختفي أو يحدث تغيّرٌ جذريٌّ فيها، فما الزمن اللازم لنا لندرك ذلك؟

38. ينبعث الضوء من مصباح عادي بصورة قطار من الومضات تدوم كلّ واحدة 10^{-8} s. ما الطول في الفضاء لمثل هذه القطارات؟

39. (أ) كم تستغرق رسالة لتصل من الأرض إلى رائد فضاء على سطح القمر؟ (ب) كم تستغرق رسالة لتصل من الأرض إلى أول رائد فضاء يحط على سطح المرّيخ بفرض أنّ بعد المريخ (78×10^{6} km).

40. إشارة ضوئية لمذياع من طاقم أبوللو على سطح القمر (الشكل 22-20) موجه إلى حشد عبر مذياع. إذا كنت تقف على بعد 25 m من المذياع، فما مقدار التأخير في الزمن بين لحظة سماعك للرسالة ولحظة انطلاقها من القمر؟



الشكل **22- 20** (مسألة 40)

* **41.** إشعاع ميكروويف كوني يملأ الفضاء كلّه بكثافة طاقة متوسطة 4×10^{-14} J/m^3. (أ) جد قيمة (rms) للمجال الكهربائيّ لهذا الاشعاع. (ب) على أي بعد من مذياع قدرته 10-kW يشع بانتظام في الاتجاهات جميعها ستجد قيمة متماثلة للسابقة؟

* **42.** ما قيمة E_0 و B_o على بعد 2.00 m من مصدر ضوئي 95-W؟ افرض أنّ المصدر يشع ترددًا منفردًا في الاتجاهات جميعها.

* **43.** احسب، بالتقريب، قيمة (rms) للمجال الكهربائيّ لضوء الشمس الذي يصطدم بالمِرّيخ مع العلم أنّ الأرض تستقبل 1350 W/m^2، وأنّ المِرّيخ على بعد 1.52 مرة قدر بُعد الأرض عن الشمس.

* **44.** عند لحظة معينة، لوحظ أنّ موجة EM متحركة يكون مجالها المغناطيسيّ الأقصى نحو الغرب، وأنّ مجالها الكهربائيّ الأقصى نحو الجنوب. بأي اتجاه تتحرك الموجة؟ إذا كان معدل تدفق الطاقة 560 W/m^2، فما قيمة المجالين القصوى؟

* **45.** احسب، بالتقريب، الطول الذي يجب أن يكون عليه هوائي AM إذا كان: (أ) $\frac{1}{2}\lambda$ (ب) $\frac{1}{4}\lambda$. إشعاع AM تقريبًا 1 MHz (530 kHz إلى 1.7 MHz).

* **46.** ما مقدار (rms) لقوّةٍ دافعةٍ كهربائيةٍ ستتولّد في هوائيٍّ يتكوّن من 380 لفّةً دائريّةً من سلك قطره 2.2 cm إذا كان تردّد موجة EM هو 810 kHz، وينقل طاقة بمعدّل متوسّط 1.0×10^{-4} W/m^2 عند الهوائي؟ [مساعدة: يمكنك استعمال (المعادلة 21 - 5) للمولّد، لأنّه يمكن تطبيقها على مراقب يتحرّك مع الملفّ بحيث يهتزّ المجال المغناطيسيّ بتردّد $f = \omega/2\pi$]

* **47.** الشدّة المتوسّطة لإشارة محطّة تلفزيون هي 1.0×10^{-13} W/m^2 عند وصولها إلى هوائي قمر صناعي قطره 33-cm. (أ) احسب الطاقة الكلية التي يستقبلها الهوائي خلال ستّ ساعات من مشاهدة برامج هذه المحطة التلفزيونية. (ب) ما مقدار اتساع كلّ من المجالين E و B لموجة EM هذه؟

* **48.** على بعد 15 km من هوائي محطّة بثٍّ إذاعي، يكون اتساع المجال الكهربائيّ 0.12 V/m. ما معدل متوسط القدرة الناتجة من محطة المذياع؟

* **49.** يتكوّن المكثّف المتغيّر في دارة توليف مذياع من ستّ صفائح تتداخل مع ستّ صفائح أخرى بالتبادل (الشكل 22 - 21) البعد بين كلّ صفيحتين متجاورتين هو 1.1 mm في الهواء. مجموعة من الصفائح يمكن تحريكها بحيث تتغير المساحة المشتركة من 1.0 cm^2 إلى 9.0 cm^2. (أ) هل هذه المكثفات متصلة على التوالي أم التوازي؟ (ب) احسب مدى قيمة السعة للمكثف. (ج) ما قيمة المحاثة اللازمة إذا كان المذياع سيستقبل محطات AM من 550 kHz إلى 1600 kHz؟



الشكل 22- 21
(مسألة 49)

* **50.** إذا كان يسمح لمحطّةِ مذياع أن تبثَّ بمعدّل قدرة لا يزيد على 25 kW. وإذا كان اتساع المجال الكهربائيّ 0.020 V/m مقبولًا للاستقبال، فاحسب بالتقريب البُعدَ الذي يمكن أن تكون عليه لسماع هذه الإذاعة.

* **51.** يطلق مصدرٌ ضوئيٌّ نقطيٌّ طاقةً ضوئيّةً منتظمةً في الاتجاهات جميعها بمعدّل قدرة P_0، وبتردد منفرد f. بيّن أنّ أكبر قيمة للمجال الكهربائيّ للموجة يعطى بالعلاقة

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 c P_0}{2\pi r^2}}$$

* **52.** افرض أنّ محطّة إذاعة تبثّ موجات EM 50 kw بانتظام في الاتجاهات جميعها. (أ) ما مقدار الطاقة في الثانية التي تعبر مساحة 1.0-m^2 على بعد 100 m من هوائي الإرسال؟ (ب) ما مقدار (rms) للمجال الكهربائيّ عند هذه النقطة بفرض أنّ المحطة تعمل بكامل قدرتها؟ (ج) ما مقدار الجهد الحثي المتولد في هوائي سيارة طوله 1.0 m عمودي عند هذه المسافة؟

* **53.** أعد حلّ المسألة 52 عندما يكون البعد 100 km من المحطة.

* **54.** ما أقصى مستوى للقدرة لمحطة الإذاعة في (المسألة 52) لتجنب انهيار الهواء الكهربائيّ على بعد 1.0 m من الهوائي؟ افرض أن الهوائي مصدر نقطي؟ الهواء ينهار كهربائيًّا عند مجال كهربائيّ يقدّر بنحو 3×10^{6} V/m. [مساعدة: انظر المسألة 51].

إجابات التمارين

أ: (أ) 3.8×10^{6} Hz (ب) 5.5×10^{18} Hz

ب: 45 cm

ج: 3 ساعات



إنّ الانعكاس عن سطح الماء الهادئ، كما الانعكاس عن مرآة زجاجيّة، يمكن تحليلهما باستعمال النّموذج الشّعاعيّ للضّوء.
هل تقف هذه الصورة بصورةٍ صحيحة؟ كيف يمكنك إثبات ذلك؟ ما براهينك؟ إنّ مخطّطات الأشعّة كما ستتعلمها في هذا الفصل ستخبرنا بأنها مقلوبة.
في هذا الفصل الأول عن الضَّوء والبصريّات، سنستخدم طريقة الأشعّة لفهم تكوين الأخيلة في المرايا بنوعيها المستوية والكرويّة، كما في العدسات أيضًا، التي تعدّ البند الأساسيّ في كثير من الأجهزة الضّوئيّة.

الفصل 23

الضَّوء: البصريّات الهندسيّة

إنّ حاسّة الإبصار مهمّةٌ جدًا لنا؛ لأنّها تزوّدنا بجزءٍ كبيرٍ من المعلومات عن العالم. كيف نرى؟ ما هو هذا الشّيء المُسَمّى بالضّوء الذي يدخل عيوننا ويسبب الإحساس بالرّؤية؟ كيف يتصرف الضَّوء بحيث نرى كلّ شيء نعمله؟ لقد رأينا في (الفصل 22) أنّ الضَّوء يمكن اعتباره نوعًا من الإشعاع الكهرومغناطيسيّ. وسوف نتناول موضوع الضَّوء بالتفصيل في الفصول الثلاثة القادمة.

يصل الضَّوء إلى عيوننا من: 1- الجسم كمصدر. 2 - انعكاس الضوء عن الجسم.

نستطيع رؤية الأشياء بواحدة من طريقتين: 1- قد يكون الجسم مصدرًا للضّوء، كالمصباح، واللهب، حيث نرى الضَّوء المنبعث من المصدر مباشرة، أو بصورة أشمل . 2- رؤية الجسم بواسطة الضَّوء المنعكس عنه. في الحالة الثانية، قد يكون الضّوء في الأصل ناتج من الشّمس، أو مصدر صناعيّ، أو نار مخيم.

إنّ كيفيّة إصدار الأجسام الضَّوء لم يتمّ فهمها إلّا في عشرينيّات القرن العشرين، وهذا ما سنناقشه في (الفصل 27). وأمّا عن كيفية انعكاس الضَّوء عن الأجسام، فقد أمكن التّوصّل إليه قبل ذلك بكثير، وسنناقشه في (البند 23-2).

1-23 نموذج الشّعاع الضّوئيّ

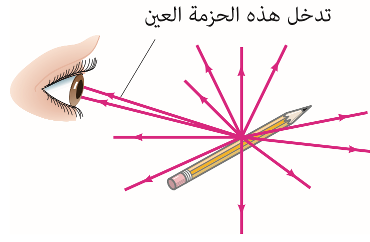
تقترح الكثير من العلامات والدلائل أنّ *الضَّوء ينتقل في خطوط مستقيمة* تحت ظروف كثيرة. فمثلًا، يلقي مصدرٌ نقطيٌ للضوء مثل الشّمس بظلال بعيدة، وحزمة الضَّوء الوميضي تبدو كخط مستقيم. وفي الحقيقة، فإنّنا نحدد أماكن الأجسام المحيطة بفرض أنّ الضَّوء يتحرّك من الجسم إلى عيوننا في مسارات مستقيمة. ويعتمد تنظيمنا للعالم الفيزيائي على هذا الفرض المعقول الذي أدى إلى *نموذج الشّعاع الضّوئيّ*.

الأشعّة الضّوئيّة

يفرض هذا النّموذج أنّ الضَّوء ينتقل في مسارات خطّيّة مستقيمة تسمى **الأشعّة**. وفي الحقيقة، الشّعاع شيء مثالي؛ ونعني به أنه يمثل حزمة ضيقة جدًا من الضَّوء.

عندما نرى جسمًا وفقًا للنموذج الشّعاعيّ، يصل الضَّوء إلى عيوننا من كلّ نقطة في الجسم. على الرّغم من أنّ الأشعّة الضّوئيّة تغادر كلّ نقطة في الجسم في اتّجاهات شتى. وفي العادة، فإنّ حزمة ضيقة من هذه الأشعّة تستطيع عبور فتحة البؤبؤ في عين المشاهد، كما هو مبين في (الشّكل 23-1). إذا تحرّك رأس المشاهد جانبًا، فإنّ حزمة مختلفة من الأشعّة سوف تدخل العين من كلّ نقطة.

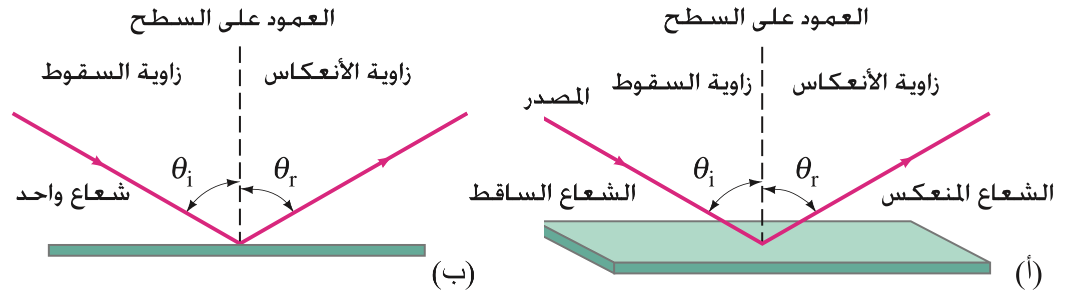
لقد رأينا في (الفصل 22) أنّ الضَّوء يمكن اعتباره موجة كهرومغناطيسية. وعلى الرّغم من أنّ النّموذج الشّعاعيّ للضّوء لا يعالج هذا الموضوع (سوف نناقش الطبيعة الموجية للضّوء في الفصل 24)، إلا أنّ نموذج الشّعاع الضّوئيّ نجح في وصف وجوه كثيرة للضّوء كالانعكاس، والانكسار، وتكوين الأخيلة بواسطة المرايا والعدسات. ولأنّ التفسيرات احتوت الكثير من الأشعّة الضّوئيّة بزوايا مختلفة، فإنّ هذا الموضوع يُقالُ له الضَّوء الهندسيّ.



الشّكل 23-1 تأتي الأشعّة الضّوئيّة من كلّ نقطة في الجسم. تخرج حزمة صغيرة من الأشعّة من نقطة واحدة، وتدخل في عين شخص ما.

23-2 الانعكاس؛ تكون الصورة في المرآة المستوية

عندما يصطدم الضَّوء بسطح جسم ما، ينعكس بعضه. وقد يمتص الجزء الباقي من قبل الجسم (ويتحول أخيرًا إلى طاقة حراريّة) أو، إذا كان الجسم شفّافًا مثل الزّجاج، أو الماء، بحيث ينفذ جزء منه من خلاله. وأمّا في الجسم المصقول جدًّا، مثل مرآة مفضّضة، فإنّ أكثر من 95% من الضَّوء يمكن أن ينعكس.



الشّكل 23-2 قانون الانعكاس (أ) يبين منظرًا ثلاثيّ الأبعاد لشعاع ساقط ينعكس فوق سطح مستوٍ؛ (ب) يبين منظرًا جانبيًّا، وهو ما سنستعمله نظرًا لوضوحه.

عندما تصطدم حزمة ضيقة من الضَّوء بسطح مستوٍ (الشّكل 23-2). نعرف **زاوية السّقوط**، θ_i، لتكون الزاوية التي يصنعها الشّعاع السّاقط مع العموديّ على السّطح، **وزاوية الانعكاس**، θ_r، الزاوية التي يصنعها الشّعاع المنعكس مع العموديّ على السّطح. وقد وُجد أنّ الشّعاعيّن السّاقط والمنعكس العموديّين على السّطح يقعان في مستوى واحد.

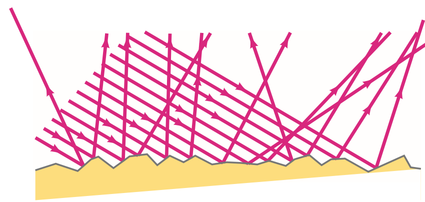
زاويتا السّقوط والانعكاس (تقاسان مع العمودي ⊥ على السّطح)

وأنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط، $\theta_r = \theta_i$؛

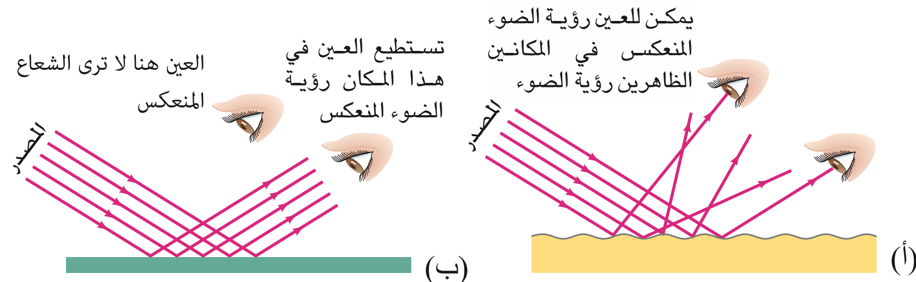
قانون الانعكاس

وهذا هو قانون الانعكاس، وهو موضح في (الشّكل 23 - 2). لقد كان هذا القانون معروفًا للإغريق القدماء، ويمكنك برهانه بنفسك باسقاط حزمة ضيقة ضوئية على مرآة في غرفة معتمة.

عند سقوط الضَّوء على سطح خشن، وحتى لو كان خشنًا مجهريًّا كهذه الصفحة، فإنّه ينعكس في اتّجاهات كثيرة، (الشّكل 23-3). وفي هذه الحالة يدعى الانعكاس المنتشر. ويبقى قانون الانعكاس ساري المفعول، ولكن على جزء صغير من السّطح. وبسبب الانعكاس المنتشر في الاتّجاهات جميعها، يمكن رؤية الجسم العادي من زوايا مختلفة بواسطة الضَّوء المنعكس عنه. وعندما تحرّك رأسك جانبًا، تصل عينيك أشعّة منعكسة مختلفة من كلّ نقطة على الجسم، (مثل هذه الصفحة)، (شكل 23-4 أ). دعنا نقارن الانعكاس المنتشر بالانعكاس عن مرآة، والذي يُسَمّى انعكاسًا منتظمًا؛ عندما تسقط حزمة ضوئية ضيقة على مرآة، لن يصل الضَّوء إلى عينيك، إلّا إذا كانت العين في الموضع الصحيح حيث يتحقق قانون الانعكاس، كما هو واضح في (الشّكل 23-4 ب). وهذا هو الذي يؤدي إلى تكوين الأخيلة في المرايا.



الشّكل 23-3 الانعكاس المنتشر من سطح خشن.

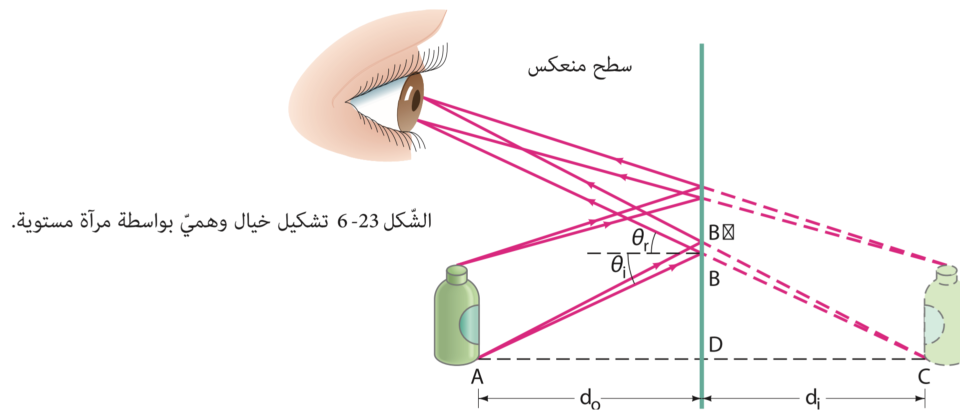


الشّكل 23-4 حزمة ضوئية تسقط على: (أ) ورقة بيضاء. (ب) مرآة. في البند (أ) تستطيع أن ترى الضَّوء الأبيض المنعكس من أماكن مختلفة بسبب الانعكاس المنتشر. ولكن في البند (ب) تستطيع فقط أن ترى الضَّوء المنعكس إذا كانت عيناك فقط في الموضع الذي يحقق $(\theta_r = \theta_i)$. وهذا هو الانعكاس المنتظم. (بين جاليليو بمثل هذه المناقشة أنّ سطح القمر خشن وليس أملسًا كما يعتقد بعضهم).

عندما تنظر مباشرةً في مرآة، فسترى ما يبدو أنّه نفسك بالإضافة لأشياء مختلفة حولك وخلفك. (الشّكل 23-5). ويبدو وجهك والأجسام الأخرى كأنها أمامك خلف المرآة. ولكنها ليست كذلك. إنّ ما تراه في المرآة هو خيال الأجسام، بما في ذلك نفسك، التي أمام المرآة.
المرآة المستوية هي ذات سطح مستوٍ أملس عاكس. ويبين (الشّكل 23-6)، كيفية تكوّن الصورة بمرآة مستوية وفقا للنموذج الشّعاعيّ. نحن ننظر إلى مرآة عند الجانب، في (شكل 23-6)، وتبين الأشعّة منعكسة عن السّطح الأمامي (المرايا الجيدة تصنع عادةً بواسطة وضع طبقة فلزية عالية الانعكاسية على سطح واحد من قطعة زجاجيّة مصقولة جيّدًا. ويبين (الشّكل 23-6)، أشعة من نقطتين مختلفتين على جسم (قنينة). شعاعان يخرجان من نقطة واحدة (قمة القنينة)، وآخران من القاعدة. إنّ الأشعّة التي تنبعث من نقطة واحدة على الجسم تتفرق في الاتجاهات جميعها، ولكن الظاهرة هي فقط الحزمة التي تدخل العينين من كلّ من النقطتين. تبدو كلّ مجموعة متباعدة من الأشعّة التي تدخل العينين قادمة من نقطة واحدة (تدعى الصورة) خلف المرآة، كما هو مبين من الخطوط المنقطة. أي أنّ عيوننا وأدمغتنا تفسّر أيّ أشعة تدخل العينين كأنها انتقلت في خطوط مستقيمة. إنّ النقطة التي تبدو كلّ حزمة قادمة منها هي نقطة واحدة على الصورة. ولكلّ نقطة على الجسم، هناك نقطة مناظرة على الصورة.



الشّكل 23-5 عندما تنظر في مرآة، ترى خيالا لنفسك والأجسام المحيطة بك. إنك لا ترى نفسك كما يراك الآخرون؛ لأنّ اتجاهيّ اليمين واليسار يظهران معكوسين في الصورة.



الشّكل 23-6 تشكيل خيال وهميّ بواسطة مرآة مستوية.

دعنا نركز على الشّعاعين المنبعثين من النقطة A على الجسم في (الشّكل 23-6). ويصطدمان بالمرآة عند النقطتين B، وB′. نستعمل الهندسة الآن للأشعة عند B. الزاويتان ADB و CDB قائمتان؛ وبسبب قانون الانعكاس، $\theta_i = \theta_r$ عند النقطة B. لذلك، من الهندسة، الزاويتان ADB و CBD متساويتان كذلك. ولهذا، يكون المثلثان ADB و CBD متشابهين. والطول $AD = CD$. أي أنّ الصورة يظهر على بعد يساوي بعد الجسم عن المرآة. أي أنّ بعد الصورة d_i (المسافة من المرآة للخيال) (شكل 23-6). يساوي بعد الجسم d_o (المسافة من الجسم إلى المرآة).

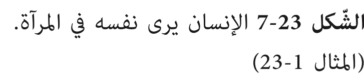
بعد الصورة = بعد الجسم (مرآة مستوية)

ونرى كذلك هندسيّا أنّ ارتفاع الصورة يساوي ارتفاع الجسم.
لن تمرّ الأشعّة في الواقع خلال موقع الصورة في (الشّكل 23-6). (لاحظ أنّ الخطوط الحمراء المتقطعة تبين أنّ هذه هي الامتدادات وليست الأشعّة الحقيقية). ولن يظهر الصورة على ورقة أو فيلم لو وضع في مكان الصورة. لذلك يسمى **خيالا وهميّا**، لتمييزه عن **الصورة الحقيقي**، حيث تمر الأشعّة فعلًا خلال الصورة. ولذلك، يمكن جمعها على ورقة أو فيلم لو وضع مكان الصورة. وباستطاعة عيوننا رؤية كلا الصورتين: الحقيقي والوهمي ما دامت الأشعّة تدخل البؤبؤ. وسوف نرى أنّ المرايا المكورة والعدسات يمكنها أن تكوّن خيالات حقيقية ووهمية أيضًا. عدسة جهاز الإسقاط السّينمائيّ مثلا، تنتج خيالا حقيقيًّا يمكن رؤيته على الشاشة.

الأخيلة الحقيقية والوهمية

المثال 23-1 ماذا يجب أن يكون ارتفاع مرآة لتكوّن خيالا كاملا لجسم الإنسان؟

طول سيدة 1.60 m تقف أمام مرآة مستوية عمودية. ما أصغر ارتفاع للمرآة؟ وماذا يجب أن يكون ارتفاع طرفها السفلي عن أرض الغرفة، إذا كانت قادرة على رؤية جسمها كاملا؟ (افرض أنّ عينيها على بعد 10 cm تحت قمة رأسها).



الشّكل 23-7 الإنسان يرى نفسه في المرآة. (المثال 23-1)

النّهج: كي ترى جسمها كاملًا؛ يجب أن تنعكس الأشعّة الضّوئيّة الصادرة من قمة رأسها، وأخمص قدميها عن المرآة وتدخل عينيها؟ انظر (الشّكل 23-7). لم نبين شعاعين صادرين من كلّ نقطة كالسابق، حيث كان هدفنا أن نبين مكان تكوّن الصورة. وحيث نعرف الآن أنّ بعد الصورة عن المرآة خلفها يساوي بعد الجسم أمامها؛ فنحن بحاجة إلى أن نبيّن شعاعًا واحدًا خارجًا من النقطة G (قمة الرأس) وشعاعًا واحدًا آخر خارجًا من النقطة A (أصبع القدم). ومن ثمّ نستعمل الهندسة البسيطة.

الحلّ: افرض أولًا أنّ الشّعاع الذي يصدر من القدم عند A ينعكس عند B، ويدخل العين عند E. المرآة ليست بحاجة إلى الامتداد أسفل B. ولأنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط، فإنّ ارتفاع BD يساوي نصف الارتفاع AE. ولأنّ الطول $AE = 1.60\ m - 0.10\ m = 1.50\ m$. فإنّ $BD = 0.75\ m$. وبصورة مشابهة، إذا كان على السيدة أن ترى قمة رأسها، فعلى قمة المرآة أن تكون عند النقطة F التي تقع 5 cm تحت قمة رأسها (نصف $GE = 10\ cm$). ولذلك، $DF = 1.55\ m$. إذن، يجب أن يكون ارتفاع المرآة $(1.55\ m - 0.75\ m) = 0.80\ m$ فقط، وأن يكون ارتفاع حافتها السفلية عن الأرض 0.75.

ملحوظة: نرى أنّ الإنسان بحاجة إلى مرآة طولها يساوي نصف طوله كي يستطيع (أو تستطيع) رؤية نفسه (أو نفسها).

تمرين أ: هل تعتمد نتيجة (المثال 23 - 1) على بعد الشخص عن المرآة؟ (حاول ذلك، لترى أنّ ذلك ممتع).

تطبيق الفيزياء

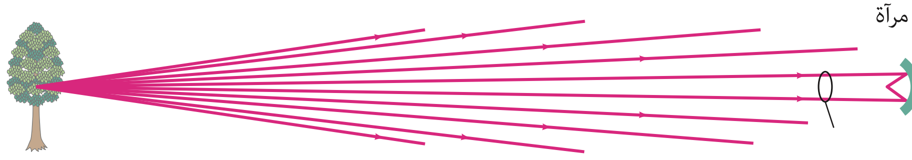
كم طول المرآة التي تحتاج إليها لرؤية انعكاس لجسمك كاملا؟

3-23 تكوين الأخيلة في المرايا الكروية

إنّ السّطوح العاكسة ليس من الضروري أن تكون مستوية؛ فمعظم المرايا المنحنية كروية، أي أنّها تشكل جزءًا من كرة. تُسَمّى المرآة الكروية محدّبة إذا حصل الانعكاس على السّطح الخارجي للشكل الكروي بحيث يظهر مركز سطح المرآة نحو الناظر (الشّكل 23 - 8أ). في حين تُسَمّى المرآة مقعّرةً إذا كان السّطح العاكس على السّطح الداخلي للكرة بحيث يغور مركزه بعيدًا عن الناظر (مثل مغارة). (الشّكل 23-8 ب). تستعمل المرايا المقعّرة للحلاقة أو الزينة (الشّكل 23 - 9أ). في حين تستعمل المرايا المحدبة أحيانًا في السيارات والشاحنات (لتعطي خيالا للمناظر الخلفية). وفي المحلات التجارية (لمراقبة اللصوص)؛ لأنّها تعرض مشاهد واسعة (الشّكل 23 - 9 ب).

الشّكل 23-8 مرايا ذات سطوح محدبة ومقعرة كروية. لاحظ $\theta_r = \theta_i$ لكلّ شعاع.

الشّكل 23-9. (أ) مرآة مقعرة تعطي خيالا مكبرًا. (ب) مرآة محدبة في محل تجاري تصغّر الصورة، ولذلك تتضمن مشهدًا واسعًا.

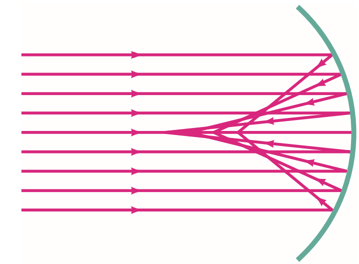


الشّكل 23-10 إذا كان بعد الجسم كبيرًا بالمقارنة مع أبعاد المرآة (أو العدسة)، فإنّ الأشعّة تكون متوازية تقريبًا. وتكون متوازية في حالة جسم يقع في اللانهاية

البؤرة والبعد البؤري

سنناقش الآن كيفية تكوّن الأخيلة بالمرايا الكروية. نفترض أولا جسمًا بعيدًا جدًّا من مرآة مقعرة. بالنسبة لجسم بعيد، كما هو مبين في (الشّكل 23 - 10)، الأشعّة الصادرة من كلّ نقطة على الجسم، والتي تصطدم بالمرآة تكون متوازية تقريبًا. أمّا بالنسبة لجسم بعيد جدًّا كالشمس والنجوم، فإنّ الأشعّة تكون متوازية تمامًا. الآن، افترض أشعة متوازية تسقط على مرآة مقعّرة كما في (الشّكل 23 - 11). ينطبق قانون الانعكاس لكلّ واحدٍ من هذه الأشعّة عند كلّ نقطة يصطدم بها على المرآة، وكما نرى، فإنّها لا تصل إلى النقطة نفسها.

ولتكوين صورة واضحة؛ يجب أن تصل الأشعّة إلى النقطة نفسها. لذا، فإنّ المرآة الكروية لا تعطي خيالًا محدّدَ المعالم كما هو الحال في المرآة المستوية. ولكن، وكما سنبيّن لاحقًا، إذا كانت المرآة صغيرة نسبة إلى نصف قطر تكورها، بحيث يكون الشّعاع المنعكس فقط زاوية صغيرة مع الشّعاع الساقط (2θفي الشكل 23-12)، عندها سوف تتقاطع الأشعّة تقريبًا عند نقطة منفردة، هي **البؤرة**.

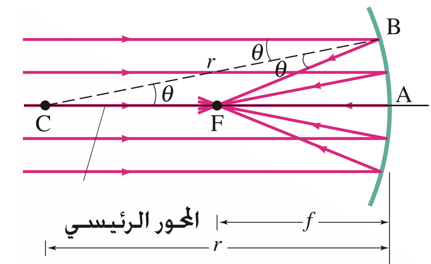


الشّكل 23-11 الأشعّة المتوازية تسقط على مرآة كروية لا تلتقي كلّها في نقطة واحدة. (يسمى هذا "العيب الزّيغ الكروي").

وفي الحالة المبينة في (الشّكل 23 - 12)، نشاهد أنّ الأشعّة توازي **المحور الرئيس**، والذي يعرف بأنه الخط المستقيم العمودي على السّطح المنحنى عند مركزه (الخط CA في الرسم). وتسمى النقطة F، حيث تلتقي الأشعّة المتوازية بعد الانعكاس، بؤرة المرآة. وتسمى المسافة بين F ومركز المرآة، الطول FA، **البعد البؤري**، f، للمرآة. البؤرة هي نقطة الصورة لجسم على بعد لا نهائي من المرآة يقع على المحور الرئيس؛ فخيال الشّمس مثلا، سيكون عند النقطة F.

وسنلاحظ الآن، أنّه في المرآة التي يكون سطحها العاكس صغيرا بالمقارنة مع نصف قطر تكورها، فإنّ الأشعّة ستلتقي عند نقطة منفردة، F، وسوف نحسب البعد البؤري، f. في هذا التقريب، نعتبر فقط الأشعّة التي تصنع زاوية صغيرة مع المحور الرئيس؛ هذه الأشعّة تدعى بالأشعّة المحورية، وزواياها يبالغ بها قليلا في (الشّكل 23-12) للتوضيح. نعتبر أولًا الشّعاع الذي يسقط على المرآة عند B في (الشّكل 23 - 12). النقطة C هي مركز تكور المرآة (مركز الكرة التي تشكّل المرآة جزءًا منها).

الشّكل 23-12 الأشعّة الموازية للمحور الرئيس لمرآة كروية مقعرة تصل إلى البؤرة F، ما دامت المرآة صغيرة من حيث العرض مقارنة بنصف قطر تكورها، r. لذلك، تكون الأشعّة محورية؛ أي أنها تصنع زاوية صغيرة مع المحور.



لذلك، فإنّ الخط المتقطع CB يساوي r، نصف قطر التكور، وCB عمودي على سطح المرآة عند B. الشّعاع القادم الذي يصطدم بالمرآة عند B يصنع زاوية θ مع العمودي. وعليه، يصنع الشّعاع المنعكس BF كذلك زاوية θ مع العمودي (قانون الانعكاس). لاحظ أنّ الزاوية BCF هي كذلك θ كما هو واضح. المثلث CBF متساوي الساقين لأنّ زاويتين فيه متساويتان، لذلك لدينا الطولCF = BF. ونعرف أنّ سطح المرآة صغير مقارنة بنصف قطر تكورها. لذا، فالزوايا صغيرة، والطول FB تقريبا يساوي الطول FA. في هذا التقريب FA = FC، ولكن $FA = f$، البعد البؤري، و$CA = 2 \times FA = r$. لذلك، فالبعد البؤري نصف قطر التكور:

البعد البؤري للمرآة

$$f = \frac{r}{2} \qquad \textbf{(1 - 23)}$$

فرضنا فقط أنّ الزاوية θ كانت صغيرة. لذلك، تنطبق هذه النتيجة على الأشعّة المحورية الساقطة. إذن، فالأشعّة المحورية كلّها تمرّ بالنقطة F نفسها.

مرآة قطع مكافئ

وبما أنه تقريبا صحيح القول إنّ الأشعّة تصل إلى البؤرة F، كلما كانت المرآة منحنية أكثر، وكلما كان التقريب أسوأ (الشكل 23-11)، وكذلك كلما كان الصورة ضبابيا (غير واضح) . يسمى هذا العيب في المرايا الكروية **"الزيغ الكروي"**، وسوف نناقشه بالتفصيل في حالة العدسات في (الفصل 25). إنّ عاكس القطع المكافئ في المقابل سوف يعكس الأشعّة إلى بؤرة تامة. وعلى أيّ حال، فإنّ سطوح القطع المكافئ يصعب تصنيعها، وبذلك تكون مكلفة. ولهذا، تستخدم المرايا الكروية لمعظم الأغراض. (كثير من المناظير الفلكية تستخدم القطع المكافئ كعاكسات). وسوف نستعمل المرايا الكروية لأنها صغيرة بالمقارنة مع أنصاف أقطار تكورها. ولذلك، تبقى (المعادلة 23-1) سارية المفعول.

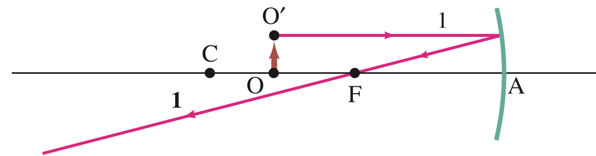
تكوين الصورة ـ مخطّطات الأشعّة

عندما يكون موضع الجسم في اللانهاية، يكون موضع الصورة في بؤرة المرآة المقعّرة الكروية، حيث $f = r/2$ ولكن أين ستتكوّن الصورة لجسمٍ ليس في اللانهاية؟ افترض أوّلاً الجسم المبيّن كسهمٍ في (الشّكل 23-13). والذي يوضع بين F و C عند النقطة O , O تعني الجسم). دعنا نحدد أين سيتكوّن الصورة لنقطة O' عند قمة السهم. لعمل ذلك، يمكننا رسم عدة أشعة، ونتأكد أنها تنعكس عن المرآة بحيث تساوي زاويةُ السّقوط زاويةَ الانعكاس. كثير من الأشعّة يمكن رسمها، ولكن تحديد مكان الصورة يمكن تبسيطه إذا تعاملنا مع ثلاثة أشعة سهلة بصورة خاصة. هذه الأشعّة موسومة بالأرقام 1، 2، 3 في (الشكل 23-13) ونرسمها صادرة من O' كما يلي:

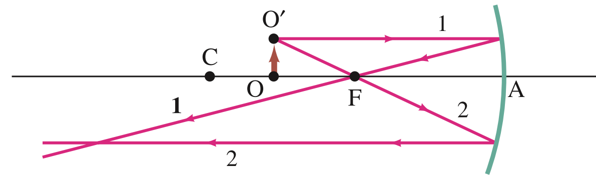
يرسم الشّعاع 1 موازيًا للمحور. لذا، فإنّ بعد الانعكاس سوف يمر بالنقطة F (كما رأينا في الشّكل 23-12 ويرسم هنا في الشكل 23-13أ).
يخرج الشّعاع 2 من O'، ويمر خلال F. ولذلك، ينعكس موازيًا للمحور (الشّكل 23-13ب).
يمر الشّعاع 3 خلال C، مركز التكور، أي على امتداد نصف قطر السّطح الكروي، أي العمودي على المرآة. ولهذا، ينعكس نحو الخلف على نفسه (الشّكل 23-13جـ).

نقطة الصورة تكون حيث تتقاطع الأشعّة المنعكسة.

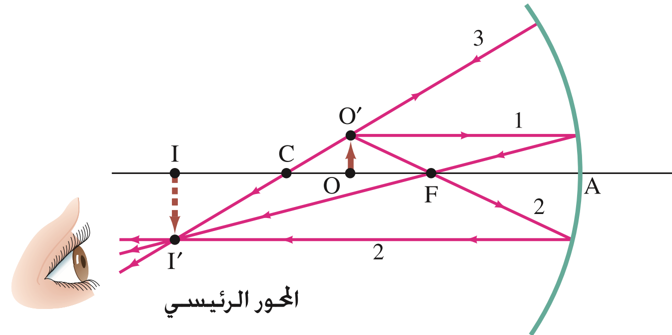
تخرج الأشعة الثلاثة من النقطة O' على الجسم. وبعد الانعكاس من سطح المرآة الصغيرة، فإنّ نقطة تقاطع هذه الأشعة هي الصورة I'. وسوف تمرّ الأشعة الأخرى كلّها التي تخرج من نقطة الجسم نفسها أيضًا بنقطة الصورة ذاتها. ولإيجاد الصورة لأيّ نقطة على الجسم؛ يلزم فقط رسم هذه الأشعة الثلاثة. اثنان منها فقط ضروريان، والثالث يخدم للاختبار.



(أ) الشّعاع 1 يخرج من O' موازيا المحور وينعكس مارا بـ F.



(ب) يمر الشّعاع 2 خلال F ثم ينعكس موازيا للمحور.



(جـ) الشّعاع 3 يختار عموديًّا على المرآة. لذلك، يجب أن ينعكس على نفسه ليمر عبر C (مركز التكور).

الشّكل 23-13. يصدر الشعاع من O' على الجسم (السهم). هنا يبين الأشعة الثلاثة الأكثر فائدة لتحديد موضع تكوّن الصورة I'.
(لاحظ أنّ مرآتنا ليست صغيرة بالمقارنة مع f. لذا، فإنّ رسمنا لا يعطي موقع الصورة بدقة).

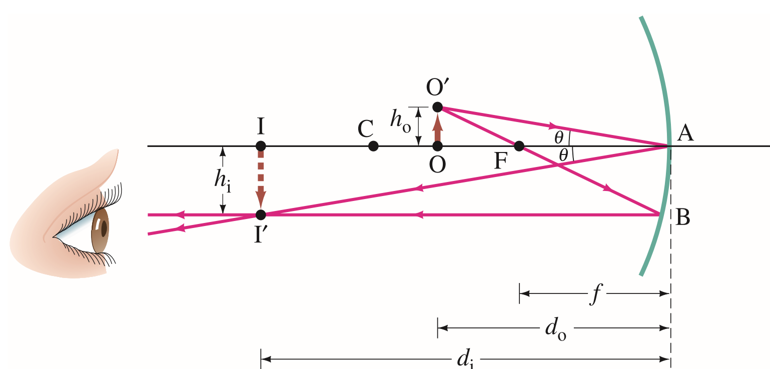
وضّحنا نقطة الصورة في (الشّكل 23-13) لنقطة واحدة فقط على الجسم. النقاط الأخرى تتكوّن أخيلتها مجاورة. وبذلك نحصل على خيال كامل للجسم، كما هو مبيّن بالسهم المنقط في (الشّكل 23-13جـ). ولأنّ الضّوء يمرّ في الواقع خلال الصورة نفسه، فهذا خيالٌ حقيقي، ويتكوّن على قطعة ورق أو فيلم يُوضع هناك.
وهذا يمكن مقارنته مع خيالٍ وهميٍّ مكّونٍ بواسطة مرآةٍ مستوية (الضّوء لا يمرّ في الواقع خلال الصورة الشّكل 23-6).
إنّ الصورة في (الشّكل 23-13) يمكن رؤيته بالعينين عند وضعهما إلى اليسار من الصورة بحيث يمكن لبعض الأشعّة المتفرقة من كلّ نقطة على الصورة (مثل النقطة I') أن تدخل العينين كما في (الشّكل 23-13 جـ). (انظر أيضًا الشّكلين 23-1 و 23-6).

معادلة المرآة والتكبير

تم قياس المسافة من d_o إلى d_i من مركز المرآة.

يمكن تحديد نقاط الصورة تقريبًا بواسطة رسم الأشعّة الثلاثة كما وصفنا. الشّكل 23-13؛ ولكن من الصعب رسم الزوايا الصغيرة للأشعة "المحورية" كما فرضنا. ومن أجل الوصول إلى نتائج أكثر دقة. نشتق معادلة تعطي بُعد الصورة إذا كان بُعدُ الجسم ونصف قطر التكور للمرآة معلومين. ولعمل ذلك نعود الى (الشّكل 23-14). **بُعد الجسم**، d_o، هو بعد الجسم (نقطة O) من مركز المرآة. **بُعد الصورة**، d_i، هو بعد الصورة (النقطة I) من مركز المرآة. طول الجسم OO' يسمى h_o، وطول الصورة $I'I$، هو h_i. شعاعان يخرجان من O' مبينان: O' FBI' (الشيء نفسه مثل شعاع 2 في الشّكل 23-13) و$O'AI'$، وهو نوعٌ رابعٌ من الأشعّة ينعكس عند مركز المرآة. ويمكن استعماله كذلك لإيجاد نقطة خيال. الشّعاع $O'AI'$ يتبع قانون الانعكاس. لذا، المثلثان قائما الزاوية $O'AO$ و $I'AI$ متشابهان. ولذلك

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{d_o}{d_i}$$



الشّكل 23-14. رسم تخطيطي لحساب معادلة المرآة، للاشتقاق نفرض أنّ المرآة صغيرة بالمقارنة بنصف قطر تكورها.

للشعاع الآخر المبين، $O'FBI'$ المثلثان $O'FO$، و AFB متشابهان كذلك؛ لأنّ الزوايا متساوية. ونستعمل التقريب $AB = h_i$ (المرآة صغيرة بالمقارنة بنصف قطر تكورها). كذلك $FA = f$، البعد البؤري للمرآة. ولذلك

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{OF}{FA} = \frac{d_o - f}{f}$$

الجانب الأيسر لكلٍّ من المعادلتين هو نفسه. لذلك، يمكننا مساواة الجانبين الأيمنين

$$\frac{d_o}{d_i} = \frac{d_o - f}{f}$$

نقسم الطرفين على d_o، وننظّم الحدود للحصول على

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \qquad (2 - 23)$$

معادلة المرآة

هذه هي المعادلة التي نريدها. وهي تُسَمّى **معادلة المرآة**، وتربط بين كلٍّ من بعد الجسم، وبعد الصورة، والبعد البؤري f (حيث $f = r/2$). التكبير، m، لمرآة هو ناتج قسمة طول الصورة على طول الجسم. من المجموعة الأولى من مثلثاتنا المتشابهة أو أول معادلة على هذ الصفحة، يمكننا كتابة ما يلي:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \qquad (3 - 23)$$

تكبير مرآة كروية

أُدخلت الإشارة السالبة في (المعادلة 23-3) كاصطلاح. وفي الواقع، يجب علينا أن نكون حريصين حول إشارة الكميات كلّها في (المعادلتين 23-2، و 23-3). تختار اصطلاح الإشارات بحيث تعطي الأمكنة الصحيحة، وأوضاع الأخيلة كما استنتجنا.

إنّ اصطلاح الإشارات الذي نستعمله هو: ارتفاع الصورة h_i موجب إذا كان الصورة معتدلًا. وسالب إذا كان مقلوبًا بالنسبة للجسم (بفرض أنّ h_o موجب). d_i أو d_o موجبان إذا كان الجسم أو الصورة أمام المرآة (كما في الشّكل 23-14)؛ إذا كان أيّ من الجسم أو الصورة خلف المرآة. فالمسافة المرافقة تكون سالبة. (يمكن رؤية مثال في الشّكل 23-16. والمثال 23-3). ولذلك. فالتكبير (معادلة 23-3) موجب لخيال معتدل وسالب لخيال مقلوب (رأسا على عقب).

وسنلخص اصطلاح الإشارات بصورة وافية بعد مناقشة المرايا الكروية في هذا البند.

تنويه: اصطلاح الإشارات

تمرين ب: هل تنطبق معادلة المرآة. (المعادلة 23-2). على المرآة المستوية؟ فسّر ذلك.

أمثلة على المرايا المقعّرة

المثال 23-2 الصورة في المرآة المقعّرة

ارتفاع خاتم الماس 1.50 cm. وُضِعَ على بعد 20.0 cm من مرآة مقعّرة نصف قطر تكورها 30.0 cm. احسب: (أ) موقع الصورة. (ب) طول الصورة .

النّهج: نحدّد البعد البؤري للمرآة من نصف قطر التكور. (معادلة 23-1)

$$f = r/2 = 15.0\ \text{cm}$$

يشبه مخطط الأشعّة في الأساس ذلك الذي في (الشّكل 23-13. أو الشّكل 23-14). حيث يقع الجسم بين F. و C. إنّ موقع الصورة وطوله يمكن إيجادهما من (المعادلتين 23 - 2. و 23 - 3).

الحلّ. بالعودة إلى (الشّكل 23 - 14). لدينا $CA = r = 30.0\ \text{cm}$. وكذلك $FA = f = 15.0\ \text{cm}$
$OA = d_o = 20.0\ \text{cm}$

تنويه: تذكّر أنْ تأخذ المقلوب.

(أ) من (معادلة 23-2)

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15.0\ \text{cm}} - \frac{1}{20.0\ \text{cm}} = 0.0167\ \text{cm}^{-1}$$

لذلك. $d_i = 1/(0.0167\ \text{cm}^{-1}) = 60.0\ \text{cm}$. لأنّ d_i موجبة. فإنّ الصورة على بعد 60.0 cm أمام المرآة.

فيجهة الجسم نفسها.

(ب) من (معادلة 23-6). التكبير هو

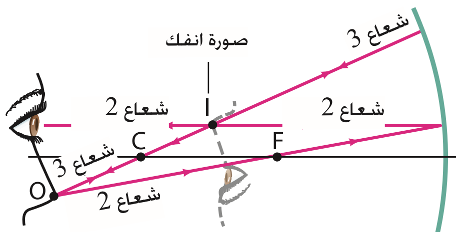
$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{60.0\ \text{cm}}{20.0\ \text{cm}} = -3.00$$

طول الصورة ثلاثة أمثال طول الجسم ويساوي

$$h_i = m h_o = (-3.00)\ (1.5\ \text{cm}) = -4.5\ \text{cm}.$$

تذكرنا الإشارة السالبة أنّ الصورة مقلوب. كما في (الشّكل 23-14).

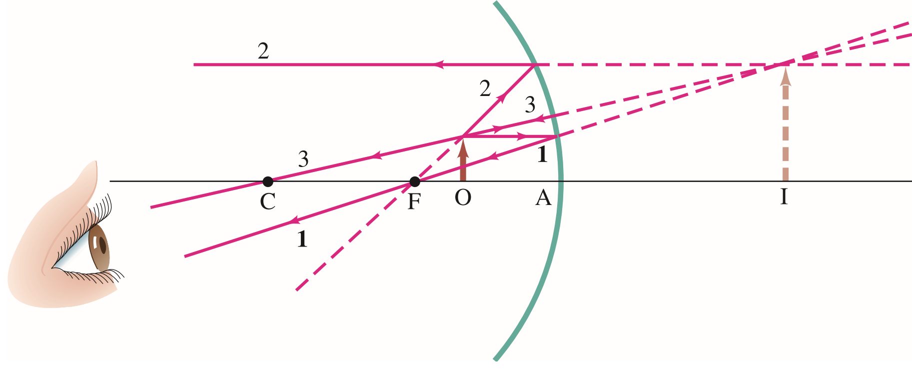
ملحوظة: إذا كان الجسم أبعد من البؤرة في المرآة المقعّرة. فيمكننا أن نرى من (الشّكلين 23-14. أو 23-14) أنّ الصورة يكون دائمًا مقلوبًا وحقيقيًّا.



الشّكل 23-15 يمكنك أن ترى خيالاً واضحًا مقلوبًا لوجهك إذا كنت أبعد من C $(d_o > 2f)$ لأنّ الأشعّة التي تصل عينيك تكون متباعدة. الشّعاعان العياريان 2 و 3 يخرجان من النقطة O على أنفك.
الشّعاع 2 (والأشعّة المجاورة) تدخل عينيك. لاحظ أنّ الأشعّة تتباعد عند انتقالها إلى يسار الصورة I.

ولكي ترى العينان خيالا واضحًا. يجب أن تكونا في مكان بحيث تعترض طريق الأشعّة المتباعدة من نقاط الصورة. كما هو الحال في موقع العينين في (الشّكلين 23 - 13. و 23 - 14). عيوننا مصممة لترى الأجسام الطبيعية. والذي يعني دائمًا أنّ الأشعّة تتباعد دائمًا نحو العينين كما في (الشّكل 23 - 1) (أو بالنسبة للأجسام البعيدة جدًّا مثل النجوم. تصبح الأشعّة في الواقع متوازية – (انظر الشّكل 23-10). إذا وضعت عينيك بين I, O في (الشّكل 23-14). مثلا. الأشعّة المتقاربة من الجسم OO' سوف تدخل عينيك. ولا تستطيع عدساتها أن تجمعها. وسترى خيالًا ضبابيًّا. سوف نناقش موضوع العين بتفصيل أكثر في (الفصل 25).

لو كنت الجسم OO' في (الشّكل 23-14). ووضعت بين F. و C. وتحاول رؤية نفسك في المرآة. فسوف ترى خيالا ضبابيًا. لكن الشخص الذي عينه مبينة في (الشّكل 23-14) يستطيع رؤيتك بوضوح. تستطيع أن ترى نفسك بوضوح ولكن بصورة مقلوبة. إذا كنت إلى يسار C في (الشّكل 23-14). لذلك $d_o > 2f$ لماذا؟ لأنّ الأشعّة المنعكسة عن الصورة ستكون متباعدة في مكانك كما في (الشّكل 23-15). ويمكن لعينيك أن تجمعها. وتستطيع كذلك رؤية نفسك بوضوح وبصورة معتدلة إذا كنت أقرب إلى المرآة من البؤرة $(d_o < f)$ كما في (المثال 23 - 3 الشّكل23-16).



الشّكل 23-16 الجسم موضوع أقرب من البؤرة F. الصورة خلف المرآة وهو وهميّ. (مثال 23-6) (لاحظ أنّ التّدريج الرّأسيّ (ارتفاع الجسم = 1.0 cm) يختلف عن الأفقيّ (OA = 10.0 cm) لسهولة الرسم، ويؤثّر في دقة الرسم.

المثال 23-3 الجسم أقرب إلى المرآة المقعّرة

وُضِعَ جسمٌ ارتفاعه 1.00 cm على بعد 10.0 cm من مرآة مقعرة نصف قطر تكورها 30.0 cm. (أ) ارسم مخطّطًا شعاعيًا لتحديد مكان الصورة على وجه تقريبيّ. (ب) حدّد مكان الصورة والتكبير بطريقة تحليلية.

النّهج: نرسم المخطط الشّعاعيّ باستخدام الأشعّة في (الشّكل 23 - 13). الحلّ بالطريقة التحليلية يستند إلى (المعادلتين 23-1، 2، و 23-3).

الحلّ: (أ) بما أنّ $f = r/2 = 15.0\,\text{cm}$. إذن، فالجسم بين المرآة والبؤرة. نرسم الأشعّة الثلاثة كما وصفنا سابقًا (الشّكل 23-13)، وهي تبدو وكأنها تغادر قمة الجسم (الشّكل 23 - 16). يخرج الشّعاع 1 من قمة الجسم متجهًا نحو المرآة موازيًا للمحور، وينعكس مارًا بـ F. أمّا الشّعاع 2 فلا يتجه نحو F لأنّه، عندها، لا يصل المرآة، ولذلك يرسم الشعاع 2 كما لو أنه يبدأ عند F (الخط المتقطع) ويتجه للمرآة، ثم ينعكس موازيًا للمحور الرّئيس. في حين يكون الشّعاع 3 عموديًا على المرآة، كما في السابق. تتباعد الأشعّة المنعكسة عن المرآة ، وبذلك لا يمكن أن تلتقي عند نقطة، ولكنها تبدو كما لو أنها قادمة من نقطة خلف المرآة. هذه النقطة تحدد موقع رأس السهم. وهكذا، فالصورة يقع خلف المرآة، وهو وهميّ. لماذا؟

(ب) نستعمل (المعادلة 23 - 2) لإيجاد d_i عندما $d_o = 10.0\,\text{cm}$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15.0\,\text{cm}} - \frac{1}{10.0\,\text{cm}} = \frac{2-3}{30.0\,\text{cm}} = -\frac{1}{30.0\,\text{cm}}$$

وهكذا $d_i = -30.0\,\text{cm}$. تعني إشارة السالب أنّ الصورة خلف المرآة. التكبير $m = -d_i/d_o = -(-30.0\,\text{cm})/(10.0\,\text{cm}) = +3.00$ أي أنّ الصورة أكبر بثلاث مرات من الجسم. أمّا الإشارة الموجبة، فتعني أنّ الجسم معتدل (مثل الجسم) وهذا يتفق مع المخطط الشّعاعيّ (الشّكل 23-16).

ملحوظة: لا يمكن استنتاج بُعد الصورة بدقة على (الشّكل 23-6)؛ لأنّ الشّكل الذي رسمناه يتنافى مع فرض الأشعّة المحورية (كي نجعل الأشعّة جميعها واضحة).

ملحوظة: عندما يكون الجسم داخل البؤرة للمرآة المقعّرة $(d_o < f)$، يكون الصورة دائمًا وهميًّا معتدلا. وعندما يكون الجسم "O" في (الشّكل 23-16) هو أنت، فسترى نفسك بوضوح؛ لأنّ الأشعّة المنعكسة عند "O" متباعدة. وخيالك سيكون معتدلًا ومكبّرًا.

رؤيتك لنفسك معتدلا ومكبرًا في مرآة مقعرة.

من المفيد مقارنة (الشّكلين 23-13، و 23-16). ويمكننا ملاحظة أنه إذا كان الجسم ضمن البؤرة $(d_o < f)$ ، كما في (الشّكل 23-16) فسيكون الصورة وهميًّا، معتدلا ومكبّرا. وهكذا تستعمل مرآة الحلّاقة أو الزّينة - يجب وضع رأسك أقرب إلى المرآة من البؤرة إذا أحببت "أن ترى نفسك معتدلا (الشّكل 23-9 أ). إذا كان الجسم أبعد من البؤرة، كما في (الشّكل 23-16)، فسيكون الصورة حقيقيًّا ومقلوبًا (رأسا على عقب – ويصعب استعمالها!).

عندما يكون التكبير أكبر من 1 في الحالة الأخيرة أو أقلّ، فإنّ هذا يعتمد على مكان الجسم بالنسبة لمركز التكور، النقطة C.

تطبيق الفيزياء

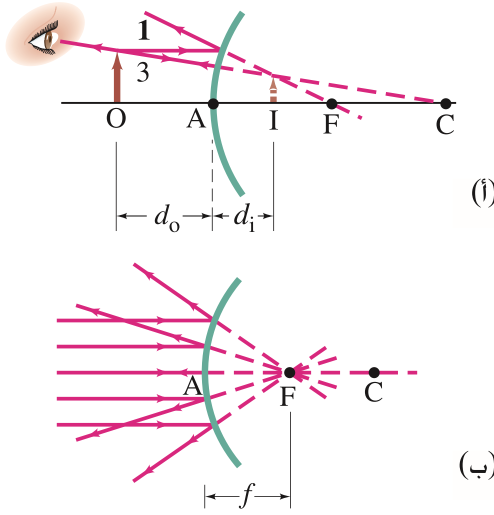
المرآة المكبرة (للحلاقة، للتزيين).

المرايا المحدّبة

إنّ التّحليل الذي استعمل في المرايا المقعّرة يمكن تطبيقه في **المرايا المحدبة**. حتى معادلة المرآة (المعادلة 23 - 2) تنطبق أيضًا على المرآة المحدبة. علمًا أنّ الكميات الداخلة في المعالجة يجب تعريفها جيدًا. يبين (الشّكل 23 - 17أ) أشعة متوازية تسقط على مرآة محدبة. كما أنّ الزّيغ الكرويّ سيكون موجودًا هنا أيضًا (الشّكل 23 - 11). لكننا نفرض أنّ حجم المرآة سيكون صغيرًا بالنسبة لنصف قطر تكورها. تتباعد الأشعّة المنعكسة، ولكنها تبدو قادمة من النقطة F خلف المرآة. هذه هي البؤرة، وبُعدها عن مركز المرآة هو **البعد البؤري** f. يمكن إثبات أنّ $f = r/2$ بسهولة. ونرى أنّ جسمًا في اللانهاية ينتج خيالًا وهميًّا في المرآة المحدبة. وفي الواقع، لا يهم أين يقع الجسم. وعلى الجانب العاكس للمرآة المحدبة، سيكون الصورة وهميًّا ومعتدلًا كما هو مبيّن في (الشّكل 23 - 17 ب).

ولتحديد مكان الصورة: نرسم الشّعاعين 1 و 3 تبعًا للقواعد المذكورة آنفًا في المرآة المقعّرة، كما يبين (الشّكل 23 - 17 ب). لاحظ أنه بالرغم من أنّ الشّعاعين 1 و3 لا يمرّان في النقطتين F و C، إلا أنّ الخطين على امتدادهما يمران (مبينان كخطوط مقطعة).

تنطبق معادلة المرآة: (المعادلة 23-2) على المرايا المحدبة، ولكن يجب اعتبار البعد البؤري f سالبًا، وكذلك نصف قطر التكور. يترك البرهان كمسألة لتبين أنّ (المعادلة 23-3) للتكبير تنطبق أيضًا في هذه الحالة.



الشكل 23-17 المرآة المحدبة:
(أ) البؤرة، F، خلف المرآة.
(ب) الصورة I للجسم O يكون وهميًا، معتدلا، وأصغر من الجسم. (الرسم ليس وفق المقياس للمثال 23-4).

إرشادات حلّ المسائل — المرايا الكرويّة

1. دائمًا، **ارسم مخطّطًا شعاعيًّا** حتى لو حللت السؤال بطريقة تحليلية (رياضيّة)، حيث يعمل المخطّط كاختبار، حتى لو لم يكن دقيقًا. من نقطة واحدة على الجسم ارسم على الأقل اثنين، ويفضل ثلاثة، من الأشعّة السهل رسمها مستعملاً القواعد الموصوفة في (الشّكل 23 - 13). وتكون نقطة الصورة حيث تلتقي الأشعّة المنعكسة، أو تبدو كذلك.

2. طبّق **معادلة المرآة**: (المعادلة 23 - 2)، و**معادلة التكبير**: (المعادلة 23 - 3). من المهم جدًّا اتباع اصطلاح الإشارات — النقطة التالية.

3. اصطلاح الإشارات

(أ) عندما يكون الجسم أو الصورة أو البؤرة على الجانب العاكس للمرآة (على يسار الرسم)، يفترض أن تكون المسافة المرافقة موجبة. أمّا إذا كان أيّ من هذه النقاط خلف المرآة (على اليمين) فمن المفروض أن تكون المسافة المرافقة سالبة.*

(ب) يكون ارتفاع الصورة h_i موجبا إذا كان معتدلا، ويكون سالبًا إذا كان الصورة مقلوبًا بالنسبة للجسم (h_o تؤخذ دائما موجبة).

4. اختبر أنّ الحلّ التحليلي (الرّياضيّ) يتفق مع مخطط الأشعّة.

المثال 23-3 المنظر الخلفي في المرآة المحدبة

تكون المرآة الخارجية للمنظر الخلفي في السيارة محدّبة بنصف قطر تكور 16.0 m (الشّكل 23-18). حدّد مكان الصورة وتكبيره لجسم على بعد 10.0 m من المرآة.

النّهج: نتبع الخطوات المذكورة في إرشادات حلّ المسائل.

الحلّ:(1) **رسم مخطط الأشعّة**: سيكون مخطط الأشعّة كما في (الشّكل 23 - 17)، ولكن مسافة الجسم الكبيرة ($d_o = 10.0\,\text{m}$) تجعل الرسم الدقيق صعبًا. لدينا مرآة محدبة، لذا، فإنّ r سالبة حسب الاصطلاح.

(2) معادلات المرآة والتكبير: مركز تكور المرآة المحدبة يكون خلفها، وكذلك بؤرتها، لذلك نعتبر r وf سالبتين.

($f = r/2 = -8.0\,\text{m}$) الجسم أمام المرآة، لذلك، $d_o = 10.0\text{m}$، ونحلّ (معادلة المرآة 23-2)

لإيجاد $1/d_i$ فنجد:
$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{-8.0\,\text{m}} - \frac{1}{10.0\,\text{m}} = \frac{-10.0 - 8.0}{80.0\,\text{m}} = -\frac{18}{80.0\,\text{m}}$$

وهكذا، فإنّ $d_i = -80.0\,\text{m}/18 = -4.4\,\text{m}$. (معادلة 23-3) تعطي التكبير الآتي:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-4.4\,\text{m})}{(10.0\,\text{m})} = +0.44$$

(3) **اصطلاح الإشارات**: بعد الصورة سالب 4.4 m-. لذلك، يكون الصورة خلف المرآة. التكبير $m = +0.44$، ولهذا، يكون الصورة معتدلًا (اتجاه الجسم نفسه) وأقلّ من نصف طول الجسم.

(4) اختبر: تتفق نتائجنا مع (الرسم 23-17 ب).

* تكون مسافات الأجسام موجبة للأجسام المادية ولكنها يمكن أن تكون سالبة في النظم التي تتكون من أكثر من عدسة أو مرآة، انظر الجزء 23-9.

تطبيق الفيزياء
مرآة المنظر الخلفي المحدبة

الشكل 23-18 (المسألة 23-4)



تحمل مرايا المنظر الخلفيّ في السيارات تحذيرًا أحيانًا في أنّ الأجسام تكون أقرب ممّا تبدو في المرآة. حقيقة أنّ d_i يمكن أن تكون أصغر من d_o (كما في المثال) تبدو وكأنّها تناقض هذه المعلومة. والسبب الحقيقيّ هو أنّ الجسم يبدو أبعد، لأنّ خياله في المرآة المحدّبة يكون أصغر. وأنّنا نحكم على مسافة الأجسام العادية مثل السيارات بواسطة حجمها.

4-23 معامل الانكسار

رأينا في (الفصل 22) أنّ سرعة الضّوء في الفراغ هي

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

والتي نقرّبها عادةً إلى

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

عندما لا تكون النتائج مطلوبةً بدقّةٍ متناهية، فإنّ هذه السرعة تنطبق على الموجات الكهرومغناطيسيّة كلّها، بما فيها الضّوء المرئيّ.

في الهواء، تكون السرعة أقلّ قليلًا. وأمّا في المواد الشفافة الأخرى، كالزّجاج والماء، فإنّ السرعة دائمًا أقلّ ممّا هي عليه في الفراغ. فمثلًا، يسير الضّوء في الماء بسرعة حوالي $\frac{3}{4}c$. تُسَمّى النسبةُ بين سرعة الضّوء في الفراغ إلى السرعة v في مادة ما **معاملَ الانكسار** n للمادة.

$$n = \frac{c}{v} \qquad \textbf{(4-23)}$$

لا يمكن أن يكون معامل الانكسار أقلّ من 1، وقيمته للمواد المختلفة تعطى في (القائمة 23-1). وكما سنرى لاحقًا، فإنّ n تختلف مع طول موجة الضّوء – ما عدا في الفراغ – لذلك، خصصت طول موجة معينة في القائمة، وهي للضّوء الأصفر الذي طول موجته $\lambda = 589$ nm.

الجدول 23 - 1 معاملات الانكسار*

الوسط	$n = c/v$
الفراغ	1.00000
الهواء (STP)	1.0003
الماء	1.33
كحول الايثير	1.36
الزّجاج	
الكوارتز	1.46
الزّجاج التّاجيّ	1.52
الزّجاج الصوانيّ	1.58
الزّجاج الصّفيريّ	1.51
كلوريد الصوديوم	1.53
الياقوت	2.42

* $\lambda = 589$ nm معامل الانكسار

المثال 23-5 سرعة الضّوء في الألماس

احسب سرعة الضّوء في الألماس.

النّهج: نستعمل (المعادلة 23 - 4)، ونجد من (القائمة 23 - 1) أنّ $n = 2.42$ للألماس.

الحلّ: سرعة الضّوء المنتقل خلال الألماس هي

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{2.42} = 0.413c$$

أو

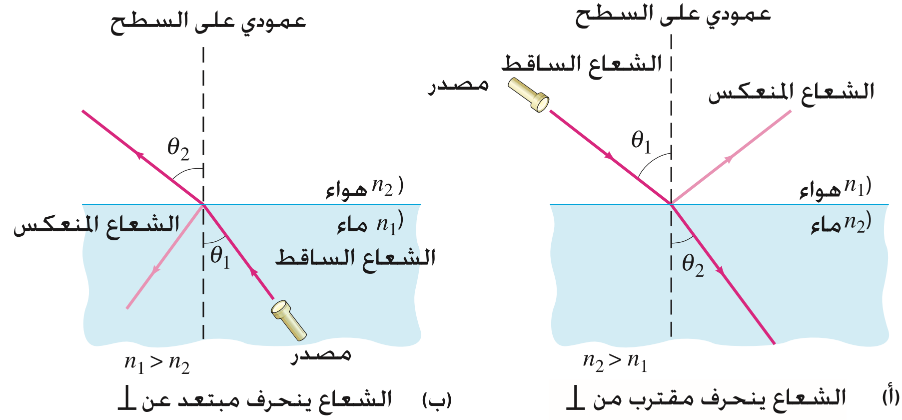
$$v = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.42} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

ولأنّ الضّوء يسير بسرعة أبطأ في المواد منه في الفراغ يمكن تفسيره على المستوى الذري، ويعزى إلى الامتصاص وإعادة الإشعاع للضّوء من قبل ذرات المادة وجزيئاتها.

5-23 الانكسار: قانون سنيل

عندما يعبر الضّوء من وسط إلى آخر بمعامل انكسار مختلف، فإنّ جزءًا منه ينعكس عند الحدّ الفاصل، في حين ينفذ الباقي إلى الوسط الشفاف الجديد. إذا سقط شعاع ضوئيّ بزاوية معينة على السّطح (غير الشّعاع العمودي)، يغيّر الشّعاع اتجاهه عند دخوله إلى الوسط الجديد.

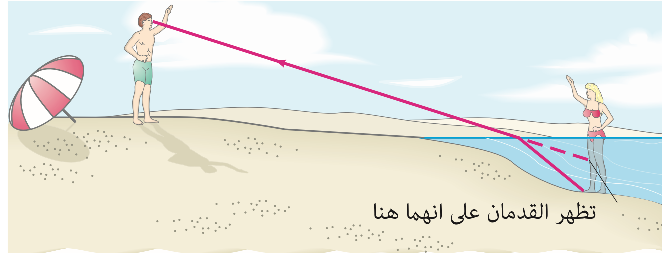
ويُسَمّى التغيّرُ في الاتجاه، أو الانحناء **الانكسارَ**.



الشّكل 23-19 الانكسار.
(أ) ينكسر الضَّوء عند عبوره من الهواء (n_1) إلى الماء (n_2): $n_1 < n_2$.
(ب) ينكسر الضَّوء عند عبوره من الماء (n_1) إلى الهواء (n_2): $n_1 > n_2$.

يبين (الشّكل 23-19أ) شعاعًا يمرّ من الهواء إلى الماء. الزاوية θ_1 هي الزاوية بين الشّعاع السّاقط والعموديّ على السّطح وتُسمّى **زاوية السّقوط**. أمّا θ_2 فهي **زاوية الانكسار**. وهي التي تقع بين الشّعاع المنكسر والعمودي على السّطح. لاحظ أنّ الشّعاع ينحني نحو العموديّ عند دخوله إلى الماء. وهذه هي الحالة عندما ينتقل الشّعاع من وسط سرعته فيه أقلّ (معامل انكساره أكبر المعادلة 23-4). وإذا انتقل الضَّوء من وسط إلى آخر حيث سرعته أكبر. ينحني الشّعاع مبتعدًا عن العمودي؛ وهذا واضح في (الشّكل 23 - 19 ب) لشعاع ينتقل من الماء إلى الهواء.

زاوية الانكسار



الشّكل 23-20 مخطط شعاعيّ يبين لماذا تبدو ساق الشخص أقصر عندما يقف في ماء عميق. مسار الضَّوء الصادر من قدم الشّخص إلى عينيّ الناظر ينحني عند سطح الماء، ودماغنا يُفسّر الضَّوء على أنه قد سار في خطّ مستقيم من مكان أعلى (الخط المنقط).



الشّكل 23-21 يبدو القلم في الماء مكسورًا علما أنه ليس كذلك.

تطبيق الفيزياء
الخدع البصرية

يفسّر الانكسار عددًا من الخدع البصريّة الشائعة. فمثلًا، تبدو أرجل الشّخص الذي يقف في ماء عميق أقصر. وكما يبدو في (الشّكل 23-20). فإنّ الأشعّة الصادرة من قدم الشّخص تنحني عند سطح الماء. ويفترض دماغ الناظر أنّ الأشعّة سارت في خطوط مستقيمة (الخطّ المنقّط الأحمر). ولذلك تبدو الأرجل أعلى ممّا هي عليه في الواقع. ومثال آخر كذلك هو أنّ القلم يبدو مكسورًا عند وضعه في الماء. (الشّكل 23-21).

قانون سنيل

تعتمد زاوية الانكسار على سرعة الضَّوء في كلّ من الوسطين. وعلى زاوية السّقوط كذلك. وهناك علاقة رياضية بين θ_1 . و θ_2 تم التوصل إليها تجريبيا في عام 1621 من قِبَل (1591-1626) *W. Snell*. تدعى قانون سنيل الذي يكتب بالصورة الآتية:

قانون سنيل
(قانون الانكسار)

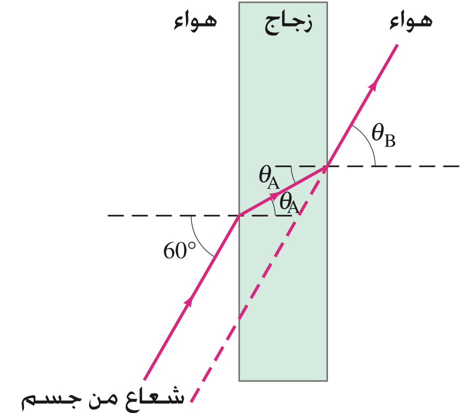
$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 . \qquad \textbf{(5-23)}$$

θ_1 هي زاوية السّقوط. أمّا θ_2 فهي زاوية الانكسار. في حين أنّ n_1، و n_2 هما معاملا الانكسار للوسطين. انظر (الشّكل 23-19). الشّعاعان: السّاقط والمنكسر يقعان في مستوى واحد. والذي يحتوي أيضًا العمود المقام على السّطح. ويعدّ قانونُ سنيل القانونَ الأساسيَّ في الانكسار. (تم اشتقاق قانون سنيل في (البند 14-11) حيث (المعادلة 20-11) هي تركيب من المعادلتين 23-5، و23-4).

تنويه:
الزاويتان θ_1، و θ_2 تقاسان مع العمود وليس مع السّطح.

ويتضح من قانون سنيل أنّه إذا كان $n_2 > n_1$. فإنّ $\theta_2 < \theta_1$ وهذا يعني أنّه لو دخل ضوء إلى وسط حيث n أكبر (سرعته أقلّ). فإنّ الشّعاع سينكسر مقتربًا من العموديّ. أمّا إذا كان $n_2 < n_1$. عندها $\theta_2 > \theta_1$ وينكسر الشّعاع مبتعدًا عن العموديّ. وهذا ما رأيناه في (الشّكل23-14).

تمرين ج: يمرُّ الضَّوءُ من وسط معاملِ انكساره $n = 1.3$ إلى وسط آخر معامل انكساره $n = 1.5$. هل سينكسر الضَّوء مبتعدًا عن العمودي علىّ السّطح الفاصل أم مقتربًا منه؟



الشّكل 22-23. الضَّوء المار خلال قطعة من الزّجاج (مثال 6-23)

المثال 6-23 الانكسار خلال زجاج منبسط

يسير ضَوء في الهواء، ويسقط على قطعة منبسطة من زجاج سمكها ثابت بزاوية 60°، كما يبدو في (الشّكل 23 - 22). إذا كان معامل انكسار الزّجاج $n = 1.50$ (أ) ما زاوية الانكسار θ_A في الزّجاج؟ (ب) ما الزاوية θ_B التي ينفذ بها الشّعاع من الزّجاج؟

النّهج: نطبق قانون سنيل على السّطح الأول، حيث يدخل الضَّوء إلى الزّجاج، ثمّ نطبّقه مرّةً أخرى على السّطح الثاني عندما يغادر الضَّوء الزّجاج الى الهواء.

الحلّ: (أ) الشّعاع ساقط في الهواء. لذلك، $n_1 = 1.00$ و $n_2 = 1.50$. ينطبق قانون سنيل بزاوية سقوط ($\theta_1 = 60°$) ونجد

$$\sin\theta_A = \frac{1.00}{1.50}\sin 60° = 0.577$$

وهكذا، فإنّ $\theta_A = 35.2°$

(ب) بما أنّ وجهي الزّجاج متوازيان، فإنّ زاوية السّقوط على السّطح الثاني ستكون θ_A (هندسة بسيطة). وعليه، $\sin\theta_A = 0.577$. عند هذا السّطح الثاني $n_1 = 1.5.0$ ، $n_2 = 1.00$. وهكذا يدخل الشّعاع إلى الهواء بزاوية $\theta_B\ (= \theta_2)$ وتعطى بـ

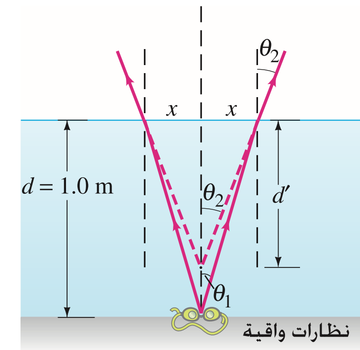
$$\sin\theta_B = \frac{1.50}{1.00}\sin\theta_A = 0.866$$

أي $\theta_B = 60°$ وهكذا، فإنّ اتجاه الشّعاع لا يتغير عند عبوره قطعة منبسطة من الزّجاج سمكها منتظم.

ملحوظة: من الواضح أنّ الحلّ صحيح مهما بلغت زاوية السّقوط. يُزاح الشّعاع قليلا إلى أحد الجانبين. ويمكنك مشاهدة ذلك بالنظر خلال صفيحة زجاجيّة؛ قرّب حافتها من جسم معين، ثم أملْ رأسَك قليلا إلى الجانب، سترى عندئذٍ أنّ الجسم "يقفز".

المثال 7-23 العمق الظاهري لبركة

الشّكل 23-23 (مثال 7-23)



ألقت سبّاحة بنظارتها الواقية إلى قعر بركةٍ ضحلةٍ عمقها 1.0 m. ولكن النظارة لا تبدو عند ذلك العمق. لماذا؟ وعلى أيّ عمق تبدو النظارة عندما ننظر إليها عموديًّا في الماء؟

النّهج: نرسم شعاعين يصعدان نحو الأعلى من نقطة في النظارة بزاوية صغيرة، وتنكسر عند سطح الماء (المنبسط). وهذا مبين في (الشّكل 23 - 22). كما تبين الخطوط المتقطعة لماذا تبدو النظارات أقرب من حقيقتها.

الشّعاعان المتجهان نحو الأعلى من النظارة ينكسران ويبتعدان عن العمود عند خروجهما من الماء، ولذلك تبدو منفرجة من نقطة فوق النظارة (الخطوط المتقطعة).

الحلّ: لحساب العمق الظاهري d' (الشّكل 23-23)، العمق الحقيقي $d = 1.0$ m نستعمل قانون سنيل حيث $n_1 = 1.33$ للماء، و $n_2 = 1$ للهواء

$$\sin\theta_2 = n_1\sin\theta_1$$

نستعمل هنا زوايا صغيرة فقط، حيث $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ وتقاس θ بالراديان. ليصبح قانون سنيل

$$\theta_2 \approx n_1\theta_1$$

من (الشّكل 23-23) نرى أنه

$$\theta_1 \approx \tan\theta_1 = \frac{x}{d} \quad \text{و} \quad \theta_2 \approx \tan\theta_2 = \frac{x}{d'}$$

ونضع ذلك في قانون سنيل $\theta_1 \approx n_2\theta_2$ لنجد

$$\frac{x}{d'} \approx n_1\frac{x}{d}$$

أو

$$d' \approx \frac{d}{n_1} = \frac{1.0\text{ m}}{1.33} = 0.75\text{ m}$$

تبدو البركة على عمق يساوي ثلاثة أرباع عمقها الحقيقيّ فقط.

6-23 الانعكاس الداخليّ الكلّيّ، الألياف الضّوئيّة

عند انتقال الضَّوء من مادة إلى أخرى حيث معامل الانكسار أقلّ (مثل، من الماء إلى الهواء) ينكسر الضَّوء بعيدًا عن العموديّ، كالشّعاعيين I و J في (الشّكل 23-24). وعند زاوية سقوط معينة، ستكون زاوية الانكسار $90°$، وفي هذه الحالة سوف يلامس الشّعاعُ المنكسرُ السّطحَ (الشّعاع K). وتُسَمّى زاويةُ السّقوط التي يحصل عندها هذا **الزاويةَ الحرجة**، θ_C.

الزاوية الحرجة

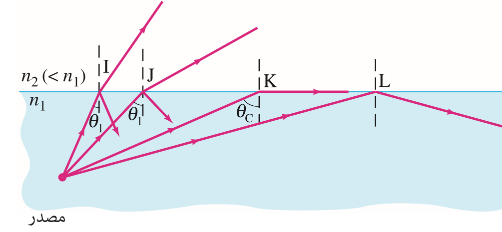
من قانون سنيل، تعطى θ_C بـ

$$\sin\theta_C = \frac{n_2}{n_1}\sin 90° = \frac{n_2}{n_1} \qquad (6 - 23)$$

تنويه: تيحصل الانعكاس الكليّ فقط إذا كان معامل انكسار الوسط الثاني (الذي ينقل إليه الضَّوء) أقلّ.

وعند أيّ زاوية سقوط أقلّ من θ_C، سيكون هناك شعاع منكسر، على الرّغم من أنّ جزءًا من الضَّوء سوف ينعكس على السّطح. ولكن، عند زوايا سقوط أكبر من θ_C، يعطينا قانون سنيل $\sin\theta_C$ أكبر من 1. وعندئذٍ، ليس هناك أيّ شعاع منكسر إطلاقًا، وسوف ينعكس الضَّوء كلّه، مثل شعاع L في (الشّكل 23-24).

يُعرف هذا الأثر بالانعكاس الداخليّ الكليّ. ولكن، لاحظ أنّ الانعكاس الداخلي الكليّ يحصل فقط عندما يسقط الضَّوء على الحدّ الفاصل حيث معامل انكسار الوسط الآخر أقلّ.



الشّكل 23 - 24 بما أنّ $n_2 < n_1$، فإنّ الأشعّة الضّوئيّة تنعكس كليًّا إذا كانت زاوية السّقوط $\theta_1 < \theta_C$ مثل الشّعاع L. أما إذا كانت $\theta_1 > \theta_C$ مثل الأشعّة I، J، فإنّ جزءًا من الضَّوء سينعكس فقط، في حين ينكسر الجزء الباقي.

المثال المفاهيمي 23-8 النظر نحو الأعلى من تحت سطح الماء

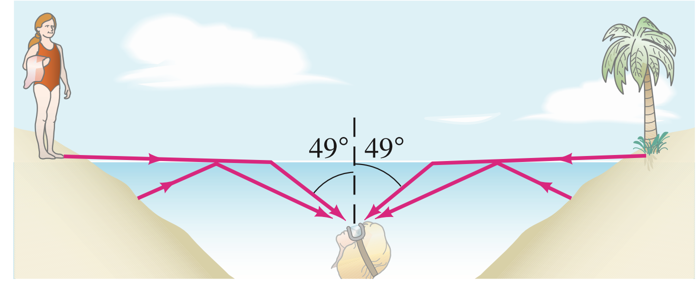
صِفْ ماذا سيرى شخص ينظر إلى العالم من تحت سطحٍ مستوٍ تمامًا لبحيرةٍ أو بركة سباحة.

الحل: إذا كان السّطح الفاصل هو بين الماء والهواء، فإنّ الزاوية الحرجة تُعطى بالعلاقة

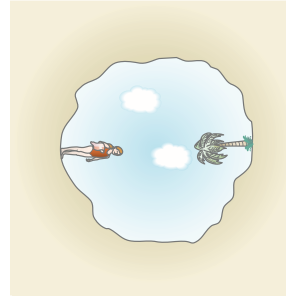
$$\sin\theta_C = \frac{1.00}{1.33} = 0.750$$

$\theta_C = 49°$. لذلك، سيرى هذا الشخص العالم مضغوطًا ضمن دائرة تصنع حافتها زاوية $49°$ مع العموديّ. ولكن خارج هذه الزاوية، سيرى الشخص انعكاسات من الجوانب، ومن قعر البركة أو البحيرة. (الشّكل 23 - 25).

تمرين د: يسقط الضَّوءُ الذي ينتقل في الهواء على سطح معامل انكساره $n = 1.48$. لأيّ مدى من الزوايا سوف يحدث الانعكاس الداخليّ الكليّ؟



(أ)



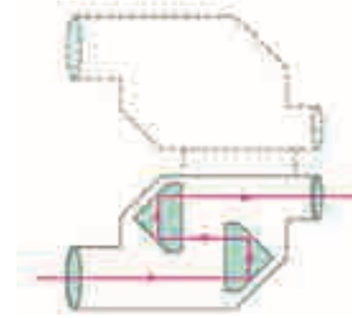
(ب)

الشّكل 23-25 (أ) أشعة ضَوئيّة. (ب) المنظر كما يبدو لشخص ينظر صوب الأعلى من تحت سطح الماء (يجب أن يكون السّطح أملسًا تمامًا). (مثال 23 - 8).

هناك الكثير من الأدوات الضّوئيّة، كالمنظار، تستخدم الانعكاس الداخليّ الكليّ من خلال منشور يعكس الضّوء. وتكمن الفائدة هنا في أنّ نحو 100% من الضّوء سينعكس، أمّا المرايا، وحتى الممتازة منها، فتعكس أقلّ من 100%. ولذلك، يكون الصورة أوضح خاصة بعد عدة انعكاسات. للزجاج $n = 1.50$، $\theta_C = 41.8°$. ولهذا، فإنّ المنشور ذا الزاوية 45° سوف يعكس الضّوء كلّه داخليًا، إذا تم توجيهه كما في (الشّكل 23-26).

تمرين هـ: إذا استعملت عدسات بلاستيكية زاويتها 45° في منظار، فما أقلّ معامل انكسار لهذه العدسات؟

تمرين و: ماذا سيحدث لو أنّ المناشير الزّجاجيّة 45° المستعملة في تمرين هـ غمرت في الماء؟



الشّكل 23-26 الانعكاس الداخليّ الكليّ في المناشير داخل المنظار.

الألياف الضّوئيّة

إنّ الانعكاس الداخليّ الكليّ هو المبدأ الأساس وراء عمل **الألياف الضّوئيّة**. وهناك أليافٌ زجاجيّةٌ وبلاستيكية بسمك ميكرومترات قليلة أصبحت شائعة. وتُسمّى الحزمة من هذه الألياف أنبوبا ضوئيًّا، أوكيبلا ضوئيًّا. والضّوء* يمكن نقله داخلها دون أيّ ضياع بسبب الانعكاس الداخليّ الكليّ. يبين (الشّكل 23-27) كيف أنّ الضّوء المرسل داخل هذه الألياف يعمل فقط اصطداما مائلا مع جدران هذه الأوعية بحيث يحصل الانعكاس الداخليّ الكليّ. حتى لو ثني الأنبوب الضّوئيّ بصورة معقدة، لا تتجاوز الزاوية الحرجة، وهكذا ينقل الضّوء إلى الطرف الثاني دون أيّ نقص. وهناك ضياع قليل جدًّا بسبب الانعكاسات عند الأطراف وكذلك بسبب الامتصاص ضمن الأنبوب.

الشّكل 23-27 الضّوء المنعكس كليّا على السّطح الداخليّ للزجاج أو البلاستيك الشفاف



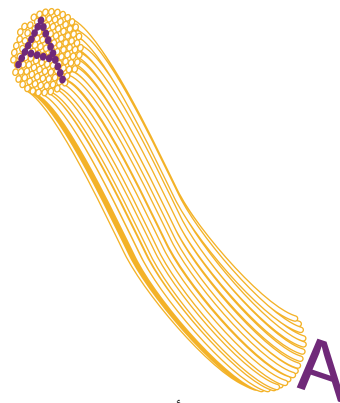
وهناك تطبيقات مهمّةٌ للألياف البصريّة في الاتصالات والطب، حيث تمّ استعمالها بدلًا من الأسلاك لنقل المكالمات الهاتفية، وإشارات الفيديو، والبيانات الحاسوبية. إنّ الإشارة هي شعاع ضوئيّ يمكن التحكم به (يمكن تغيير شدته)، وهي قادرة على نقل البيانات بمعدل أكبر بكثير، وبفقد قليل، وبتداخل قليل أيضًا مقارنة مع الإشارات الكهربائيّة التي تنقل بواسطة أسلاك النحاس. لقد تمّ تطوير ألياف يمكن أن تحمل أكثر من مئة طول موجة منفصلة، ويمكن التّحكّم بكلّ منها لتحمل إلى 10 جيجابت (10^{10} bits) من المعلومات في الثانية. وهذا يصل إلى (10^{12} bits) بيت في الثانية لكلّ المئة طول موجة. كما أنّ الاستعمال المعقد للألياف البصرية لنقل صورة واضحة مهمّ جدًّا في مجال الطّبّ. (الشّكل 23-28). مثلا، يمكن فحص رئتي مريض بإدخال أنبوب ضَوئيّ عن طريق القصبة الهوائيّة من الفم. يرسل الضّوء عبر مجموعة خارجية من الألياف لإضاءة الرئتين. ويُعاد الضّوء المنعكس بواسطة مجموعة من الألياف. وعند الطرف الآخر، يرى الناظر سلسلة من النقاط المضيئة والمعتمة كشاشة التلفزيون، أي أنّه يرى صورة لما يحدث في الطرف المقابل. تستعمل العدسات لجعل الأشعّة عند الطرف متوازية كما في التلسكوب. ويمكن رؤية الصورة مباشرة أو بواسطة جهاز عرض. ويجب أن تكون الألياف معزولة عن بعضها بواسطة مادة طلائية رقيقة بمعامل انكسار أقلّ من مادة الألياف. وكلّما كان عدد الألياف أكبر، وكلما كانت أصغر قطرًا، حصلنا على صورة أكثر تفصيلا.

إنّ مثل هذه الأدوات لتنظير الرئتين والقولون والمعدة ذات فائدة جمّة لفحص الأجزاء التي يصعب الوصول إليها.

* إنّ الألياف الضّوئيّة مفيدة في الأشعّة تحت الحمراء وفوق البنفسجية والميكرووية، وليس في الضّوء المرئيّ فقط .

تطبيق الفيزياء
الألياف الضّوئيّة في الاتصالات.

تطبيق الفيزياء
الطب – في تنظير الرئتين والقولون والمعدة.

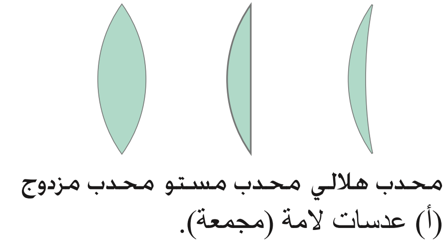


(أ)

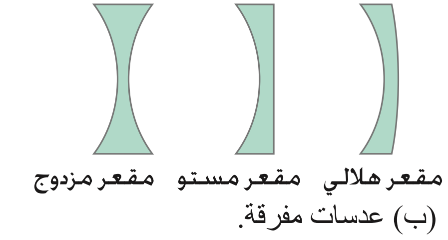


(ب)

الشّكل 23-28 (أ) كيف نحصل على خيال في الألياف البصرية. (ب) مثال على جهاز يعمل بالألياف داخل الأنف، وترى الصورة.



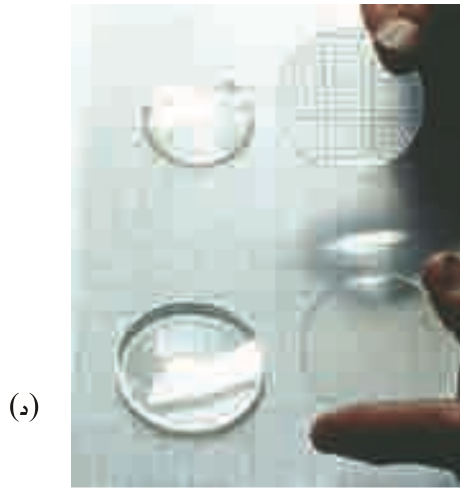
(أ) عدسات لامة (مجمعة).



(ب) عدسات مفرقة.



(ج)



(د)

الشكل 23-29 (أ) عدسات لامّة (مجمعة). (ب) عدسات مفرّقة مبينة مثل مقاطع. (جـ) صورة لعدسة لامّة (إلى اليسار)، وعدسة مفرقة (إلى اليمين) (S) عدسات لامة (فوق)، وعدسات مفرقة (تحت) منبسطة ومرفوعة فوق الورقة لتشكيل أخيلة.

7-23 عدسات رقيقة؛ رسم الأشعّة

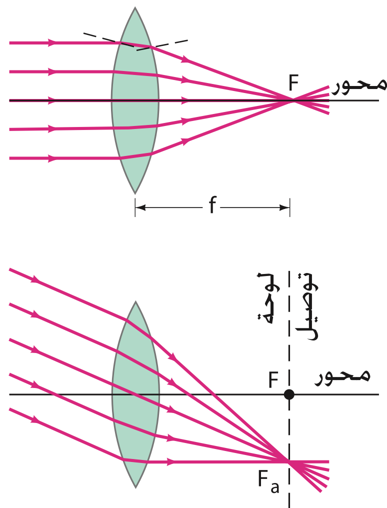
إنّ أكثر الأدوات الضّوئيّة البسيطة أهمية بلا منازع هي العدسة الرقيقة. يعود تطوير الأجهزة البصرية باستعمال العدسات تاريخيًّا إلى القرنين السّادس عشر والسّابع عشر، على الرّغم من أنّ أول سجلّ لعدسات النظارات يعود إلى نهاية القرن الثّالث عشر. أما اليوم، فنجد استعمال العدسات في النظارات، وآلات التصوير، وأدوات التكبير، والتلسكوبات، والمناظير، والميكروسكوبات، والأجهزة الطبية. وفي العادة، تكون العدسة الرقيقة دائرية الشّكل، ووجهاها أجزاء من كرة. (على الرّغم من أنّ الأسطوانة أيضًا واردة، إلّا أنّنا سنركز على الكروية). ويمكن أن يكون السّطحان مقعّرَين، أو محدّبَين، أو مستويَين. وهناك عدة أنواع مبينة في (الشّكل 23-29)، بصورة مقطعية. وتعود أهمية العدسات إلى قدرتها على تكوين أخيلة للأجسام، كما في (الشّكل 23-30).



الشّكل 23-30 عدسة لامة (مجمّعة) (موضوعة على حامل) تكوّن خيالا (""F كبيرة على شاشة إلى اليمين لجسم لامع ("F" مضاءة إلى اليسار).

تأمّل أشعةً متوازيةً تسقط على عدسةٍ محدّبةٍ الوجهين، كما في (الشّكل 23-31 أ). افرض أنّ العدسة مصنوعة من الزّجاج أو البلاستيك الشفاف، حيث معامل انكسارها أكبر من معامل انكسار الهواء المحيط بها. **محور** العدسة هو خطّ مستقيم يمرّ في مركز العدسة، ويكون عموديًا على وجهيها (الشّكل 23-31). من قانون سنيل، نرى أنّ كلّ شعاع في (الشّكل 23-31 أ) ينحني نحو المحور عند دخوله العدسة وخروجه منها. (لاحظ أنّ الخطوطَ المتقطعة عموديةٌ على السّطح للشعاع العلوي). إذا سقطت أشعة موازية للمحور الرئيس لعدسة رقيقة، فإنّها تتجمع في نقطة تسمى البؤرة، F. وهذا ليس بالغ الدقة بالنسبة لعدسة سطحاها كُرويّان. ولكن سيكون هذا صحيحا لدرجة كبيرة – أي أنّ الأشعّة سوف تتجمع في بقعة كنقطة تقريبًا – إذا كان قطر العدسة صغيرًا مقارنة بنصفي قطري تكوّر سطحيها. إنّ هذا المعيار تحققه العدسة الرقيقة، تلك الرقيقة بالنسبة لقطرها. وسوف نعتبر هنا العدسات الرقيقة فقط.

الشّكل 23-31 (تحت) أشعة متوازية تجمع في البؤرة بواسطة عدسة رقيقة لامّة.



إنّ الأشعّة الآتية من نقطةٍ في جسمٍ بعيد تُعدُّ متوازيةً تقريبًا - انظر (الشّكل 23-10). لذلك نقول: إنّ البؤرة هي نقطة الصورة لجسمٍ في اللانهاية على محور العدسة. وهكذا، يمكن إيجاد البؤرة لعدسة بتحديد النقطة التي تتجمع فيها أشعة الشّمس (وأيّ جسم آخر بعيد). (الشّكل 23-32).

البعد البؤري للعدسة

يسمّى بُعْدُ البؤرة عن مركز العدسة البُعدَ البؤريَّ f. ويمكن أن تُقلبَ العدسة بحيث يدخل الضّوء خلالها من الجانب المقابل. البعد البؤري هو نفسه من الجهتين، كما سنرى لاحقًا، حتى لو كان تحدب (انحناء) الوجهين مختلفًا. إذا سقطت أشعة متوازية على وجه العدسة بزاوية كما في (الشّكل 23-32 ب)، فإنّها تتجمع في نقطة F_a. ويسمّى المستوى الذي تتجمع فيه النقاط كلّها مثل F ، F_a المستوى البؤريّ للعدسة.



الشّكل 23-32. خيال الشّمس يحرق ثقبا في قطعة من الورق.

أي عدسة* تكون أسمك في المنتصف من الأطراف سوف تعمل على تجميع الأشعّة المتوازية في نقطة، وعندئذٍ تسمّى عدسةً لامّةً (مُجمِّعة) (انظر الشّكل 23-29أ).

أمّا العدسات التي يكون سمكها في المنتصف أقلّ من الأطراف (الشّكل 29-23ب) فتسمى عدساتٍ مفرقةً لأنّها تحرف الأشعّة المتوازية، كما في (الشّكل 23-33).

تعرف بؤرة العدسة F، المفرّقة بأنها النقطة التي تبدو منها الأشعّة المنكسرة خارجة، والتي تنشأ من أشعة متوازية ساقطة، كما في (الشّكل 23-33). ويُسمى البُعْدُ بين F والعدسة البعدَ البؤريَّ f مثل العدسة اللاّمة.

قدرة العدسة

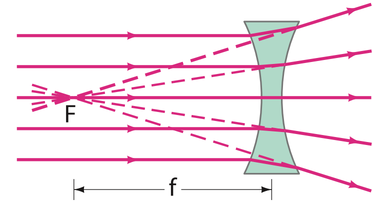
يستعمل المختصون في البصريّات وأطباء العيون مقلوب البعد البؤري لتحديد قوة عدسات النظارات (أو العدسات اللاصقة)، بدلا من استعمال البعد البؤري. ويعرف ذلك **بقدرة العدسة** p

$$P = \frac{1}{f} \tag{7-23}$$

وحدة قدرة العدسة هي **ديوبتر** (D) وهي مقلوب المتر $1\ D = 1\ m^{-1}$. فمثلا، عدسة بعدها البؤري 20 cm لها قدرة في الأساس، $P = 1/(0.20\ m) = 5.0\ D$ سوف نستعمل البعد البؤري، ولكننا سنعود إلى قدرة العدسة عند مناقشة عدسات النظارات في (الفصل 25).

الشّكل 23 - 33.

عدسة مفرقة



إنّ أهم عامل في العدسة هو بعدها البؤري f. ولعدسة لامة، يمكن قياس f بسهولة بإيجاد نقطة الصورة للشّمس، أو أيّ جسم بعيد. وعند معرفة f يمكن حساب مكان الصورة لأيّ جسم آخر. إنّ إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة يعدّ عملاً صعبًا؛ لأنّ علينا معرفة معامل الانكسار، وكذلك زاوية السّقوط والخروج من سطحي العدسة. ويمكن تجاوز هذا العناء باستخدام بعض الحقائق المعروفة لدينا، مثل شعاع يوازي المحور الرئيس يمرّ (بعد الانكسار) بالبؤرة. ولتحديد نقطة الصورة يلزمنا فقط اعتبار الأشعّة الثلاثة المبينة في (الشّكل 23-34)، حيث نستخدم سهما ليدلّ على الجسم، وعدسة لامّة تكوّن الصورة إلى اليمين. هذه الأشعّة تصور من نقطة واحدة على الجسم، وترسم كما لو كانت العدسة رقيقة جدًّا، ونبين انحناءة واحدة عند مركز العدسة بدل الانكسارات على السّطحين. وترسم هذه الأشعّة كما يلي:

مخطط الأشعّة إيجاد موقع الصورة المكون بواسطة عدسة رقيقة.

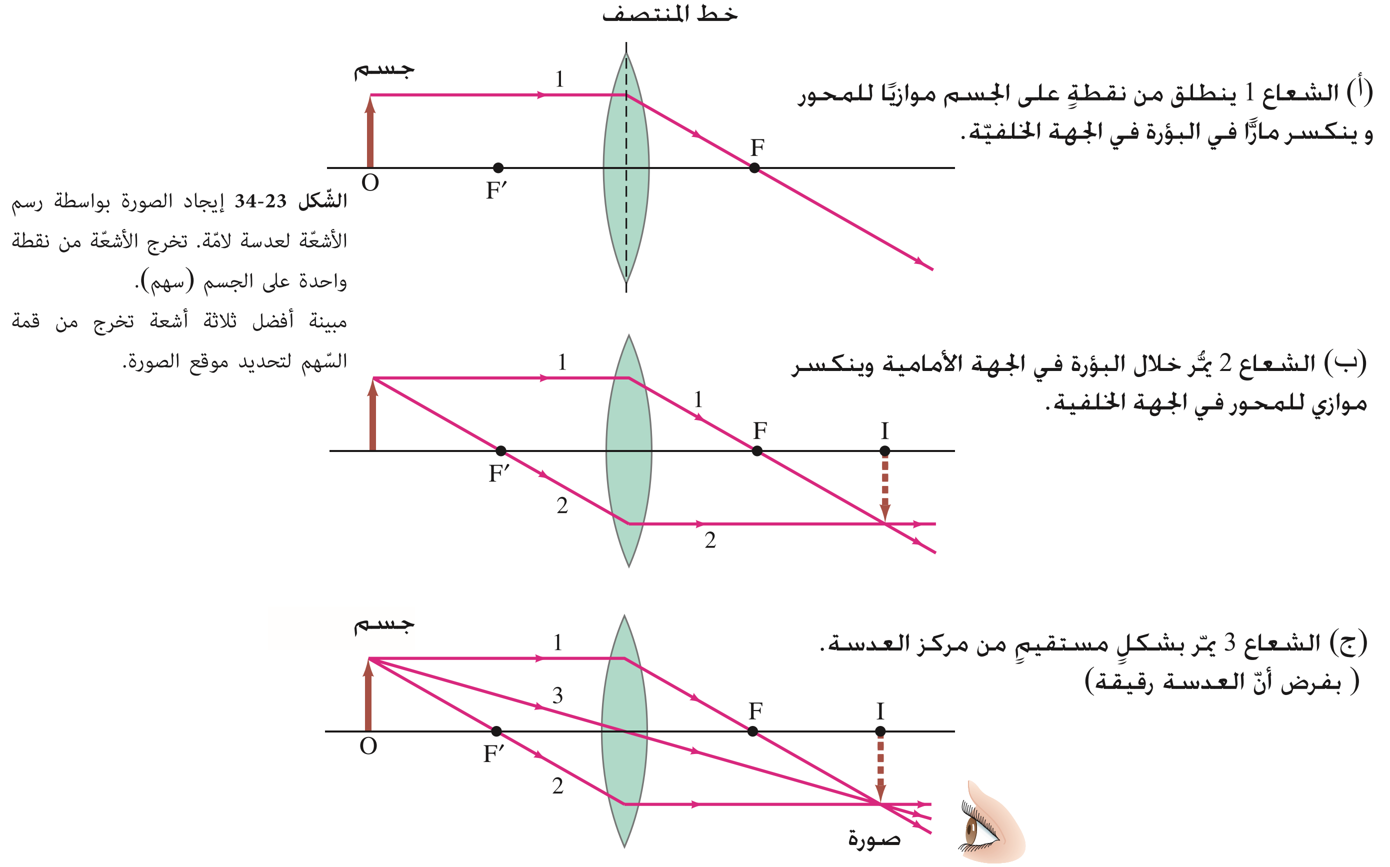
الشّعاع 1، يُرسم موازيًا للمحور الرّئيس، ولذلك ينكسر مارًّا بالبؤرة F خلف العدسة، (الشّكل 23-34 أ). انظر لذلك (الشّكل 23-31أ).

الشّعاع 2، يُرسم على شكل خطٍّ يمرُّ في البؤرة الثانية F' الجانب الأول للعدسة في (الشّكل 23-34)، ثم يخرج من العدسة موازيا للمحور الرئيس.

الشّعاع 3، يوجّه نحو مركز العدسة حيث يكون السّطحان متوازيين، وهذا الشّعاع يمرُّ موازيًا لنفسه، ويُزاح قليلا فقط؛ لأنّ العدسة رقيقة. كما أنّه يرسم بصورة خطٍّ مستقيم. (الشّكل 23-34 جـ).

النقطة التي تتقاطع عندها هذه الأشعّة الثلاثة هي نقطة الصورة لنقطة الجسم المختارة. وفي الواقع، فإنّ أيّ شعاعين من الثلاثة يكونان كافيَيْن لتحديد مكان الصورة، ولكن رسم الشّعاع الثالث يلزم فقط كاختبار.

* نعرف أنّ معامل انكسار مادة العدسة أكبر من محيطها، مثل عدسة زجاجيّة في الهواء، وهو الوضع المألوف.



الشّكل 23-34 إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة لعدسة لامّة. تخرج الأشعّة من نقطة واحدة على الجسم (سهم).
مبينة أفضل ثلاثة أشعة تخرج من قمة السّهم لتحديد موقع الصورة.

باستعمال هذه الأشعّة الثلاثة لنقطة واحدة من الجسم، يمكننا إيجاد نقطة الصورة لنقطة الجسم هذه (قمة السّهم الشّكل 23-34). ويمكن إيجاد نقاط الصورة الأخرى لنقاط الجسم المختلفة بالطريقة نفسها لرسم الصورة كاملا. ولأنّ الأشعّة الحقيقية تمرّ من نقاط الصورة، فإنّه يُعدّ **خيالاً حقيقيًّا** (انظر صفحة 634). ويمكن الكشف عن الصورة بواسطة فيلم أو شاشة بيضاء توضع في مكان الصورة (الشّكل 23-35).

رؤية الصورة

كما يمكن رؤية الصورة مباشرة أيضًا بالعين عند وضعها خلفه، كما هو مبيّنٌ في (الشّكل 23 - 34 جـ). بحيث إنّ بعض الأشعّة المتفرقة من كلّ نقطة عليه تدخل العين. ونستطيع أن نرى خيالا واضحًا (حادًّا) فقط للأشعة المتفرقة (الصادرة) من كلّ نقطة في الصورة، لأنّنا نرى الأجسام العادية عندما ندخل الأشعّة الصادرة من كلّ نقطة في الصورة إلى العين كما يُرى من (الشّكل 23-1).
لا تستطيع العين أن تركز أشعة متجمعة عليها؛ إذا وضعت العين بين النقطتين F و I في (الشّكل 23-34 جـ). فلن ترى خيالا واضحا. (سندرس الكثير عن عيوننا في البند 25-2).


(أ)

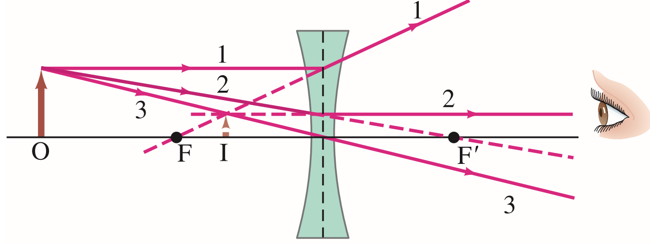

(ب)

الشّكل 23-35. (أ) تستطيع العدسة اللامة تكوين خيال حقيقيّ (هنا لبناية بعيدة مقلوبة) على شاشة. (ب) الصورة نفسه كما تراه العين.
[(**الشّكل 23-29 د**) يبين أخيلة تراها العين مكونة بواسطة عدسات مفرّقة وأخرى مُجمِّعة].

العدسة المفرّقة

يمكننا تحديد موقع الصورة الذي تكوّنه عدسةٌ مفرّقةٌ بواسطة رسم الأشعّة الثلاثة نفسها التي تصدر عند نقطة واحدة في الجسم، كما هو مبيّن في (الشّكل 23-36). لاحظ أنّ الشّعاع 1 المرسوم موازيا للمحور الرّئيس لا يمرّ خلال البؤرة F' خلف العدسة، ولكنه يبدو قادما من البؤرة F أمام العدسة (الخطّ المتقطع). أمّا الشّعاع 2، فموجّه مباشرة إلى F'، وينكسر موازيًا للمحور الرّئيس، في حين يمرّ الشّعاع 3 مباشرة خلال مركز العدسة.

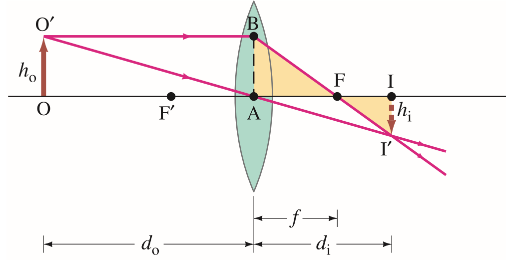
تبدو الأشعّة المنكسرة كلّها كأنها صادرة من نقطة إلى يسار العدسة، وهذه هي نقطة الصورة I. ولأنّ الأشعّة لا تمرّ حقيقة في الصورة، لذا، فهو **خيال وهميّ**. لاحظ أنّ العين لا تميّز بين خيالٍ حقيقيٍّ وآخر وهميٍّ؛ كلاهما يمكن رؤيته.



الشّكل 23-36 إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة لعدسة مفرقة.

8-23 معادلة العدسة الرقيقة؛ التكبير

سنشتق الآن معادلة تربط بين كلٍّ من بُعد الجسم، وبُعد الصورة، والبُعد البؤريّ لعدسة رقيقة. هذه المعادلة تجعل إيجاد موقع الصورة أسرع وأكثر دقة من رسم الأشعّة. افرض أنّ d_o هي بُعد الجسم؛ أي بُعده عن مركز العدسة، وأنّ d_i بُعد الصورة؛ أي بُعده عن مركز العدسة. وافرض أنّ h_o هو طول الجسم، و h_i طول الصورة. خذ الشّعاعين المبينين في (الشّكل 23 - 37) لعدسة لامّة. يفترض أنها رقيقة. المثلثان القائمان $FI'I$، و AFB (ملونان بالأصفر) متشابهان؛ لأنّ الزاوية AFB تساوي الزاوية IFI'. لذلك،



الشّكل 23-37 اشتقاق معادلة العدسة، العدسة لامّة.

IFI'

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i - f}{f}$$

ولأنّ الطول $AB = h_o$، فإنّ المثلثين OAO'، و IAI' متشابهان. ولهذا، فإنّ

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

نساوي الجانبين على اليمين لهاتين المعادلتين، الجانبان على اليسار في المعادلتين متساويان، ثم نقسم على d_i لنجد

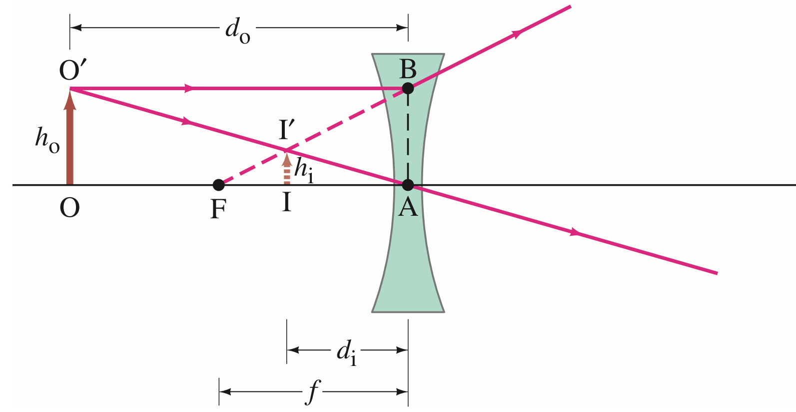
$$\frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_o}$$

أو

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \qquad (8\text{-}23)$$

معادلة العدسة الرقيقة

تسمى هذه d_o **معادلةُ العدسة الرقيقة**. إنّها تربط بُعْدَ الصورة d_i ببُعدِ الجسم والبُعد البؤريّ f. وهي أكثر معادلة أهميّة في الضّوء الهندسيّ. (ونظرًا للأهمية نشير إلى أنّها تحمل صيغة معادلة المرآة نفسها، المعادلة 23-2). إذا كان الجسم في اللانهاية، عندها $1/d_o = 0$. وهكذا، فإنّ $d_i = f$. أي أنّ البُعد البؤري هو بُعد الصورة لجسم في اللانهاية، كما ذكرنا سابقًا.



الشّكل 23-38 اشتقاق معادلة العدسات لعدسة مفرقة.

يمكننا اشتقاق معادلة العدسة لعدسة مفرقة باستعمال (الشّكل 23-38). المثلثان IAI′ و OAO′ متشابهان. وكذلك المثلثان IFI′ و AFB متشابهان أيضا. وهكذا (مع ملاحظة أنّ الطول $AB = h_o$)

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} \quad \text{و} \quad \frac{h_i}{h_o} = \frac{f - d_i}{f}$$

وعند مساواة الطرفين على اليمين في المعادلتين مع التبسيط. نجد أنّ

$$\frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{f}$$

تنويه:

البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة سالب.

هذه المعادلة تصبح (كمعادلة 23-8) إذا جعلنا f و d_i سالبين. أي أنّنا نعتبر f سالبة للعدسة المفرّقة، و d_i سالبًا عندما يكون الصورة في الجهة نفسها من العدسة كالجسم، أي التي يأتي منها الضَّوء. وهكذا تصبح (المعادلة 23-8) سارية المفعول لكلتا العدستين المجمعة والمفرّقة وللأوضاع جميعها ، إذا استعملنا **اصطلاحات الإشارات** التالية:

1. البعد البؤري موجب للعدسة اللامة، وسالب للعدسة المفرّقة.
2. بعد الجسيم موجب إذا كان الجسم على الجانب من العدسة الذي يسقط منه الضَّوء (هذه هي الحالة المعتادة، علمًا أنّ ذلك قد يختلف عندما تستعمل مجموعة من العدسات معًا). ما عدا ذلك سيكون سالبًا.
3. بعدُ الصورة موجبٌ إذا كان الصورة في الجهة المقابلة من العدسة للجهة التي يسقط منها الضَّوء؛ وإذا كان الصورة في الجهة نفسها، فإنّ d_i سالب. وهذا يكافئ بعد الصورة الحقيقي موجب وللوهمي سالب.
4. طول الصورة h_i موجب إذا كان معتدلاً، وسالب إذا كان مقلوبًا بالنسبة للجسم. (h_o تؤخذ دائمًا موجبة).

التكبير m للعدسة يعرف بأنّه النسبة بين طول الصورة إلى طول الجسم، $m = h_i/h_o$ من (الشّكلين 23-37، و 23-38) والاصطلاحات التي سبق ذكرها والتي تحتاج إلى إشارة سالبة لتنسجم معها، نحصل على

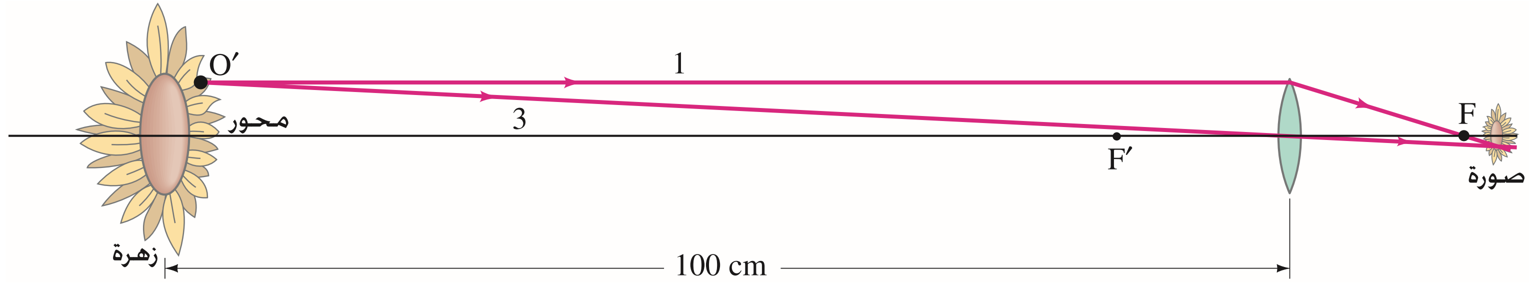
تكبير العدسة

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}. \qquad \textbf{(9-23)}$$

ويكون التكبير موجبًا للخيال المعتدل، وسالبًا للخيال المقلوب.
من مصطلح الإشارات 1، يترتب على ذلك أنّ القدرة (معادلة 23-7) للعدسة اللامة، موجبة، في حين تكون القدرة للعدسة المفرّقة سالبة. وتُدعى العدسةُ اللامة أحيانًا **العدسةَ الموجبةَ**، و**العدسةُ المفرّقةُ** العدسةَ السالبةَ.

طريقة حلّ الأسئلة: المجال المغناطيسيّ

1. ارسم **مخطّطًا** للأشعة بدقة متناهية؛ فالمخطط التقريبي يمكنه دعم النتائج الرياضية (التحليلية). اختر نقطة على الجسم، وارسم شعاعين على الأقلّ، ويفضل ثلاثة من الأشعّة التي يسهل رسمها، والتي وصفت في (الشّكلين 23-34، و 23-36). وتكون نقطة الصورة عند تقاطع هذه الأشعّة.
2. في الحلّ الرّياضيّ، حلَّ المعادلات لإيجاد مجاهيل في معادلة **العدسة الرقيقة** (المعادلة 23-8). **والتّكبير** (المعادلة 23-9). معادلة العدسة تحتوي على مقلوب الكميات، وتذكّر أن تأخذ المقلوب.
3. اتبع **اصطلاح الإشارات** آنفة الذكر.
4. تحقق من توافق نتائجك التحليلية مع مخطط الأشعّة.



الشّكل 23-39 (مثال 23-9) (ليس وفقا لمقياس رسم).

المثال 23-9 خيال مكوّن بواسطة عدسة لامّة

زهرةٌ طولها 7.6 cm موضوعةٌ على بعد 1.00 m من عدسة كاميرا بعدها البؤري +50.0 mm. ما: (أ) موقعها؟ (ب) طول خيالها؟

النّهج: نتبع الخطوات المذكورة في إرشادات حلّ المسائل بوضوح.

الحلّ:

(1) رسم مخطط الأشعّة: (الشّكل 23-39) هو مخطط أشعة تقريبي يبين الشّعاعين 1 و 3 لنقطة واحدة على الزهرة. نرى أنّ الصورة على بعد قليل خلف البؤرة F إلى يمين العدسة.

(2) معادلات العدسة الرقيقة والتكبير: (أ) نجد بُعْدَ الصورة رياضيًا باستعمال معادلة العدسة (المعادلة 23-8). عدسة الكاميرا لامة وبعدها البؤري $f = +5.00\ \text{cm}$، و $d_o = 100\ \text{cm}$. وهكذا نجد من معادلة العدسة

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{5.00\ \text{cm}} - \frac{1}{100\ \text{cm}}$$

$$= \frac{20.0 - 1.0}{100\ \text{cm}} = \frac{19.0}{100\ \text{cm}}$$

وهكذا، فإنّ

$$d_i = \frac{100\ \text{cm}}{19.0} = 5.26\ \text{cm}$$

(ب) التكبير هو

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{5.26\ \text{cm}}{100\ \text{cm}} = -0.0526$$

ولذلك، $h_i = mh_o = (-0.0526)(7.6\ \text{cm}) = -0.40\ \text{cm}$

إذن، طول الصورة 4.0 mm.

(3) اصطلاح الإشارات. وجد ألفا بُعدُ الصورة d_i موجب. لذا، فالصورة خلف العدسة. كما أن طول الصورة $h_i = -0.40\ \text{cm}$، وتعني أشارة السالب أن الصورة مقلوبة.

(4) التوافق: تتفق النتائج التحليلية في الخطوتين الثانية والثالثة مع مخطَّطِ الأشعّة (الشّكل 23-39): حيث أن الصورة خلف العدسة ومقلوبة.

ملحوظة: يشير الفرع (أ) إلى أنّ الصورة تبعد 2.6 mm عن العدسة أكثر من خيالِ جسمٍ في اللانهاية، والذي يساوي بعده البعد البؤري ومقداره 50.0 mm. وفي الواقع، عند ضبط عدسة الكاميرا، كلّما وُجِدَ وضع العدسة في أبعد مسافة عن الفليم، كان الجسم أقرب إلى الكاميرا.

تمرين ز: إذا حركت الزهرة (الجسم) في (المثال 23 - 9) وأبعدت عن العدسة، فهل يقترب الصورة من آلة التصوير؟ أم يبتعد عنها؟ (لا تحسب!).

المثال 23-10 الأجسام القريبة من عدسة لامّة

إذا وُضع جسمٌ على بعد 10 cm من عدسة لامّة، بعدُها البؤري 15 cm، فحدّد موقع الصورة وطوله: (أ) رياضيا. (ب) باستعمال مخطط أشعة.

النّهج: نستعمل أولا (المعادلتين 23 - 8، و 23 - 9) للحصول على حلّ تحليليّ، ثمّ نتأكّد بواسطة المخطط الشّعاعيّ باستعمال الأشعّة 1، و 2، و 3 لنقطة من الجسم منفردة.

الحلّ: (أ) أعطينا $f = 15$ cm، و $d_o = 10$ cm، لذلك

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{15\text{ cm}} - \frac{1}{10\text{ cm}} = -\frac{1}{30\text{ cm}}$$

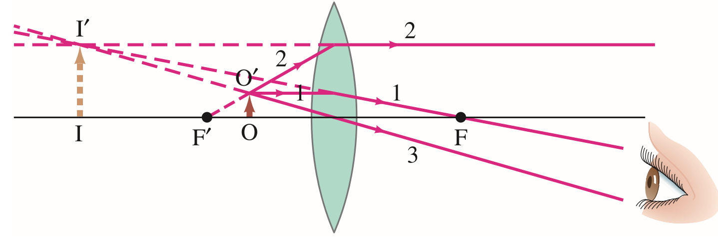
وهكذا $d_i = -30$ cm (تذكر أنّ تأخذ المقلوب) لأنّ d_i سالبة يجب أن يكون الصورة وهميًّا، وفي الجهة من العدسة نفسها التي يقع فيها الجسم.

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{-30\text{ cm}}{10\text{ cm}} = 3.0.$$

طولُ الصورةِ ثلاثةُ أمثالِ طولِ الجسم، والصورة معتدل. تستخدم هذه العدسة كعدسة تكبير بسيطة والتي سنناقشها بتفصيل أكثر في (البند 25-3). (ب) مخطط الأشعّة مبين في (الشّكل 23-40) ويؤكد النتائج في الفرع (أ). نختار النقطة O' قمة الجسم ونرسم الشّعاع 1، وهذا سهل. أمّا الشّعاع 2 فيحتاج إلى تفكير: لو رسمناه متجها إلى F'، فإنّه سيذهب في الطريق الخطأ. لذا، سنرسمه كما لو كان قادمًا من F' (ولذلك نرسمه متقطعا). يصطدم بالعدسة، ثم يخرج موازيا محورها. ثم نسقطه للخلف، كما يجب أن نعمل في الشعاع 1 أيضًا، لتحديد موقع تقاطعهما. في حين يُرسم الشّعاع 3 مارًا بمركز العدسة، ويتقاطع مع الشّعاعين السّابقين عند النقطة I'.

ملحوظة: من (الشّكل 23-40)، يمكننا ملاحظة أنه إذا كان الجسم موضوعًا بين البؤرة والعدسة اللامة، فإنّ الصورة وهميّ.

تنويه:
تذكّر أن تأخذ المقلوب.



الشّكل 23-40 جسم موضوع أقرب من البؤرة لعدسة لامة ينتج خيالا وهميًا. (مثال 23-10)

المثال 23-11 عدسة مفرقة

أين يجب وضع حشرة صغيرة من عدسة مفرقة بعدها البؤري 25 cm لتكون خيالًا وهميًا على بعد 20 cm أمام العدسة؟

النّهج: المخطّط هو في الأساس المبيّن في (الشّكل 23 - 38) لأنّ العدسة هنا مفرقة والصورة أمام العدسة ضمن البعد البؤري.

(قد يكون تمرينًا مهمًّا أن ترسم المخطَّطَ الشّعاعيَّ وفقَ مقياس رسمٍ بدقة). يمكن حسابُ بُعد الحشرة d_o من معادلة العدسة.

الحلّ: العدسة مفرقة، ولذلك، تكون f سالبة: $f = -25$ cm

ويجب أن يكون بعد الصورة سالبا؛ لأنّه أمام العدسة (اصطلاح الإشارات)، لذلك $d_i = -20$ cm.

وتعطينا (المعادلة 23 - 38)

$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{25\text{ cm}} + \frac{1}{20\text{ cm}} = \frac{-4+5}{100\text{ cm}} = \frac{1}{100\text{ cm}}$$

إذن، يجب أن يكون الجسم على بعد 100 cm أمام العدسة.

تمرين ح: إذا وُضع جسمٌ على بعد 12 cm من عدسة بعدها البؤري 15 cm، فهل سيكون الصورة حقيقيّا أم وهميّا إذا كانت العدسة: (أ) لامة؟ (ب) مفرقة؟

تمرين ط: حدّد موقع الصورة الناتج من عدسة مجمعة بعدها البؤري 15.0 cm عند وضع جسم على بُعد 13.0 cm أمامها.

* 9-23 تراكيب العدسات

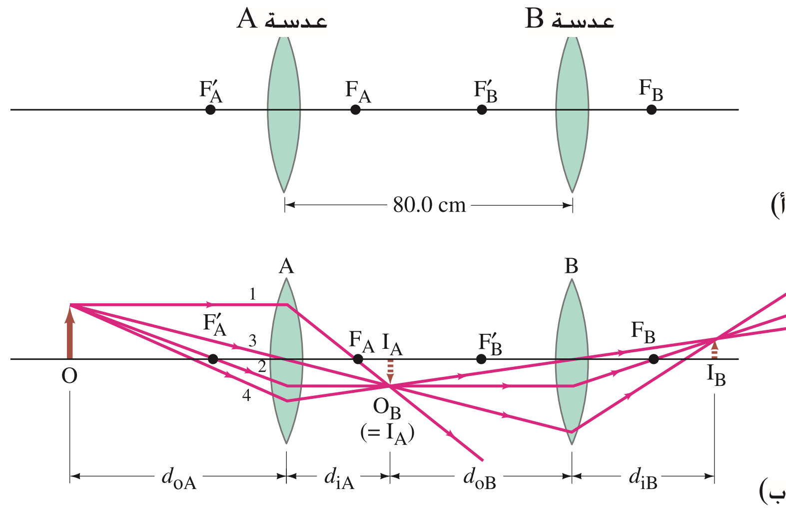
سنناقش الآن كيفيّةَ التعامل مع العدسات المستعملة كمجموعة. عندما يمرّ الضّوء في أكثر من عدسة، نجد الصورة المكوّن بالعدسة الأولى كما لو كانت وحدها. ويصبح هذا الصورة هو الجسم للعدسة الثانية، ثمّ نجد الصورة المكوّن في العدسة الثانية، والذي سيكوّن الصورة النّهائيّ. وفي حال وجود عدستين فقط، فإنّ التكبير الكليّ سيكون حاصل ضرب تكبير كلّ من العدستين بصورة منفصلة.

وتبقى هذه الطريقة صالحة حتى لو اعترضت العدسة الثانية طريق الضّوء من العدسة الأخرى قبل أن يتشكّل الصورة.

العدسات المتعددة: الصورة المكوّن بالعدسة الأولى يعمل جسمًا للعدسة الثانية.

المثال 12-23 نظام العدسات الثنائية

وُضعت عدستان لامتان، A و B بعداهما البؤريان $f_A = 20.0$ cm و $f_B = 25.0$ cm، بحيث كان البُعد بينهما 80.0 cm كما هو مبين في (الشّكل 23 - 41أ). ووضع جسم على بعد 60.0 cm أمام العدسة الأولى كما هو مبين في (الشّكل 23 - 41ب). حدّد: (أ) موقع الصورة النهائي الناتج من نظام العدستين. (ب) التكبير لهذا الصورة.



الشّكل 23-41. عدستان A و B تستعملان كمجموعة، (مثال 23-12). الأرقام الصغيرة تعود إلى الأشعّة التي يسهل رسمها.

النّهج: نبدأ بقسمة الجسم O . نرسم الأشعّة 1، 2، 3 للعدسة الأولى A، وكذلك الشّعاع 4 الذي بعد مروره في العدسة A يعمل كشعاع "3" (خلال المركز) للعدسة الثانية B. يخرج الشّعاع 2 للعدسة A موازيا، لذلك سيكون الشّعاع 1 للعدسة B. لتحديد الصورة I_A الذي تكونه العدسة A؛ نستعمل (المعادلة 23-8) حيث $f_A = 20.0$ cm و $d_{oA} = 60.0$ cm بُعد الصورة I_A عن العدسة B هو بُعد الجسم d_{oB} عن العدسة B. ونجد الصورة النهائيّ باستعمال معادلة العدسة، ولكن في هذه المرّة، تنسب المسافات كلّها للعدسة B. وللفرع (ب)، نجد التكبيرين من (معادلة 23-9) لكلّ عدسة على الترتيب.

الحلّ: (أ) الجسم على بعد $d_{oA} = +60.0$ cm من العدسة A.

نجد بُعد الصورة باستعمال معادلة العدسة كما يلي:

$$\frac{1}{d_{iA}} = \frac{1}{f_A} - \frac{1}{d_{oA}} = \frac{1}{20.0\text{ cm}} - \frac{1}{60.0\text{ cm}} = \frac{3-1}{60.0\text{ cm}} = \frac{1}{30.0\text{ cm}}$$

لذلك، بُعد الصورة I_A يساوي $d_{iA} = 30.0$ cm خلف العدسة الأولى. وتُصبح هذه الصورةُ الجسمَ بالنسبة للعدسة الثانية B.

ويبعد $d_{oB} = 80.0\text{ cm} - 30.0\text{ cm} = 50.0\text{ cm}$ أمام العدسة B، كما يبين (الشّكل 23-41ب). الصورة المكوّنة بالعدسة B ثانية باستعمال معادلة العدسة، يكون على بعد d_{oB} من العدسة B:

$$\frac{1}{d_{iB}} = \frac{1}{f_B} - \frac{1}{d_{oB}} = \frac{1}{25.0\text{ cm}} - \frac{1}{50.0\text{ cm}} = \frac{2-1}{50.0\text{ cm}} = \frac{1}{50.0\text{ cm}}$$

وهكذا، فإنّ $d_{iB} = 50.0$ cm خلف العدسة B. وهذه هي الصورة النهائيّة. انظر (الشّكل 23-41ب).

تنويه:

لاحظ أنّ بُعْدَ الجسم عن العدسة الثانية لا يساوي بُعْدَ الصورة النّاتج من العدسة الأولى

(ب) تكبير العدسة A (معادلة 9-23)

$$m_A = -\frac{d_{iA}}{d_{oA}} = -\frac{30.0\text{ cm}}{60.0\text{ cm}} = -0.500$$

إذن، تكون الصورة الأولى مقلوبة وطولها يساوي نصف طول الجسم.

$$h_{iA} = m_A h_{oA} = -0.500 h_{oA}$$

تعتبر العدسة B هذه الصورةَ جسمًا، وتغيّر طوله بمعامل

$$m_B = -\frac{d_{iB}}{d_{oB}} = -\frac{50.0\text{ cm}}{50.0\text{ cm}} = -1.000$$

تعكس العدسة الثانية الصورة (الإشارة السالبة)، ولكنها لا تغيّر من طوله. حيث يكون طول الصورة النهائي هو (تذكّر أنّ h_{oB} تساوي h_{iA})

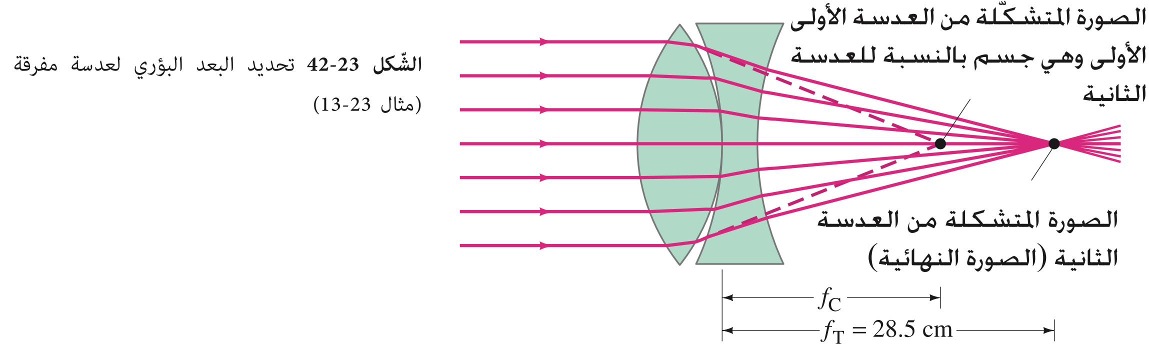
التكبير الكليّ يساوي $m_{total} = m_A m_B$

$$h_{iB} = m_B h_{oB} = m_B h_{iA} = m_B m_A h_{oA} = (m_{total}) h_{oA}$$

فيكون التكبير النهائي هو حاصل ضرب m_A في m_B، وهذا يساوي

$$m_{total} = m_A m_B = (-1.000)(-0.500) = +0.500$$

أو نصف الطول الأصلي، حيث تكون الصورة النهائية معتدلة.



الشّكل 23-42 تحديد البعد البؤري لعدسة مفرقة (مثال 23-13)

المثال 23-13 قياس f لعدسة مفرقة

لقياس البعد البؤري لعدسة مفرقة، تُوضع عدسةٌ لامّة ملامسة لها، كما يبين (الشّكل 23 - 42). تتجمع أشعة الشّمس بواسطة هذا الترتيب عند نقطة على بعد 28.5 cm خلف العدستين. إذا كان البعد البؤري للعدسة اللامة f_C يساوي 16.0 cm، فما البعد البؤري للعدسة المفرّقة f_D؟ افرض أنّ العدستين رقيقتان، وأنّ الحيز بينهما مهمل.

النّهج: بُعْدُ الصورة في العدسة الأولى يساوي بعدَها البؤري (16.0 cm)؛ لأنّ بُعْدَ الجسم ما لا نهايّ (∞). ويعمل بُعدُ هذا الصورة الذي لا يتشكل في الواقع كجسم للعدسة الثانية (المفرّقة). ونطبق معادلة العدسة الرقيقة على العدسة المفرّقة لنجد مكان تكوّن الصورة النهائيّ.

الحلّ: تتجمّع الأشعّة من الشّمس على بعد 28.5 cm من المجموعة. لذا، فالبعد البؤريّ الكليّ للمجموعة يساوي $f_T = 28.5$ cm. ولو كانت العدسة المفرّقة غائبة، فستكوّن العدسةُ المجمعة الصورةَ في الوسط؛ أي على بعد $f_C = 16.0$ cm خلفها (الخطوط المقطعة في الشّكل 23-42). وعند إدخال العدسة المفرّقة خلف العدسة اللامة، فسنعامل الصورة المكوّن من العدسة الأولى كجسم بالنسبة للعدسة الثانية. ولأنّ هذا الجسم يأتي على يمين العدسة، فإنّ بعده d_o سالب (انظر اصطلاح الإشارات صفحة 651). وهكذا بالنسبة للعدسة المفرّقة، الجسم وهميّ وبعده سالب $d_o = -16.0$ cm. العدسة المفرّقة تكوّن خيالا لهذا الجسم على بعد $d_i = 28.5$ cm. لذا

$$\frac{1}{f_D} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-16.0\text{ cm}} + \frac{1}{28.5\text{ cm}} = -0.0274\text{ cm}^{-1}$$

ونأخذ المقلوب لنجد $f_D = -1/(0.0274\text{ cm}^{-1}) = -36.5$ cm.

ملحوظة: إذا أريد لهذا النّظام أن يعمل؛ فيجب أن تكون العدسة اللامة "أقوى" من العدسة المفرّقة؛ أي يجب أن يكون بعدها البؤري أقلّ من البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة.

* 10-23 معادلة صانعي العدسات

هناك معادلةٌ مفيدةٌ تُعرف بمعادلة **صانعي العدسات**. تربط البعدَ البؤريَّ للعدسة بنصفي قطري تكور سطحيها R_1، و R_2 ومعامل انكسارها n:

معادلة صانعي العدسات

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \qquad \textbf{(10-23)}$$

إذا كان السّطحان محدّبين، فإنّ R_1، و R_2 موجبان* .
وبالنسبة إلى السّطح المقعّر يجب اعتبار نصف القطر سالبًا.
لاحظ أنّ (المعادلة 23-10) متماثلة بالنسبة إلى R_1، و R_2. لذلك، إذا قُلبت العدسة بحيث يسقط الضّوء على الوجه الآخر للعدسة، فإنّ البُعد البؤري هو نفسه حتى لو كان السّطحان مختلفين.

المثال 23-14 حساب البُعد البؤريّ لعدسة لامّة

عدسةٌ هلاليةٌ محدّبةٌ (الشّكلان 23 - 29أ، و 23 - 43) مصنوعةٌ من زجاج معامل انكساره $n = 1.50$. نصف قطر تكور السّطح المحدب 22.4 cm وذلك للسطح المقعر 46.2 cm. احسب البعد البؤريّ.

النّهج: نستخدم معادلة صانعي العدسات. (المعادلة 23-10) لحساب f.

الحلّ: $R_1 = 22.4\ \text{cm}$، و $R_2 = -46.2\ \text{cm}$ (السّطح المقعر). ثم

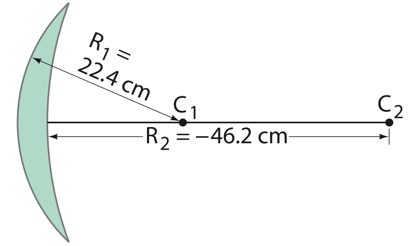
$$\frac{1}{f} = (1.50 - 1.00)\left(\frac{1}{22.4\ \text{cm}} - \frac{1}{46.2\ \text{cm}}\right) = 0.0115\ \text{cm}^{-1}$$

وهكذا

$$f = \frac{1}{0.0115\ \text{cm}^{-1}} = 87\ \text{cm}$$

والعدسة لامة لأنّ $f > 0$

ملحوظة: إذا قلبنا العدسة بحيث $R_1 = -46.2\ \text{cm}$، و $R_2 = +22.4\ \text{cm}$، فسنحصل على النتيجة نفسها.



الشّكل 23-43 (مثال 23-14).

* تستعمل بعض الكتب اصطلاحات مختلفة. فمثلًا، تعتبر R_1، R_2 موجبة إذا كانت مراكز التكور إلى يمين العدسة. وفي مثل هذه الحالة لتستبدل إشارة + بالإشارة المعادلة لها في (المعادلة 23-10)

ملخص

يبدو أنّ الضّوء ينتقل في خطوط مستقيمة تُسمّى "**أشعة**" بسرعة v التي تعتمد على **معامل الانكسار** n للمادة.

$$\text{حيث}\quad n = \frac{c}{v} \qquad \textbf{(4-23)}$$

حيث c سرعة الضّوء في الفراغ.
عندما ينعكس الضّوء عن سطح مستوٍ، فإنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط. يبين **قانون الانعكاس** هذا كيف تكوّنُ المرايا الأخيلةَ.
في **مرآة مستوية**، الصورة وهميّ، معتدل، وله طول الجسم نفسه، وعلى بعد خلف المرآة يساوي بعد الجسم عن المرآة.
المرآة الكروية يمكن أن تكون محدّبة أو مقعّرة.
المرآة المقعّرة تجمع الأشعّة الضّوئيّة المتوازية (أي القادمة من مصدر بعيد) في نقطة تسمى البؤرة، وتسمى المسافةُ من هذه النقطة الى المرآة **البعدَ البؤري** f للمرآة و

$$f = \frac{r}{2} \qquad \textbf{(1-23)}$$

حيث r هو نصف قطر تكور المرآة.

تنعكس الأشعّة المتوازية السّاقطة على **مرآة محدّبة** عن المرآة كما لو أنّها تتفرّق من نقطةٍ مشتركة خلف المرآة. بعد هذه النقطة عن المرآة هو البعد البؤري للمرآة، ويعدّ سالبًا للمرآة الحدبة.
لجسمٍ معيّن، يمكن إيجاد كلّ من الموقع التقريبي وطول الصورة المتكون في المرآة بواسطة رسم الأشعّة. جبريًا، تُعطى العلاقةُ بين مسافات الأخيلة والأجسام، d_i و d_o والبعد البؤري **بمعادلة المرآة** الآتية:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(2-23)}$$

النسبة بين طول الصورة h_i إلى طول الجسم h_o تساوي التكبير m للمرآة، وتساوي

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \qquad \textbf{(3-23)}$$

إذا تجمّعت الأشعّة ومرّت في الصورة فعليًا بحيث تظهر الصورة على فيلم أو شاشة، يُقال إنّ هذا **الصورة حقيقيّة**. ولكن إن لم تمرّ الأشعّة فعليًا في الصورة، فإنّ **الصورة وهميّة**.

عند مرور الضّوء من وسطٍ شفّافٍ إلى آخر، فإنّ الأشعّة تنحرف أو تنكسر. **قانون الانكسار (قانون سْنيل)** ينصّ على ما يلي:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \textbf{(5-23)}$$

حيث n_1، وθ_1 هما معامل الانكسار والزاوية مع العموديّ على السّطح للشعاع السّاقط، و n_2، و θ_2 هما للشعاع المنكسر.

عند وصول الأشعّة إلى السّطح الفاصل للمادة حيث يقلّ معامل الانكسار، فإنّ الأشعّة **تنعكس انعكاسًا كليًّا** إذا كانت زاوية السّقوط θ_1 حسب قانون سنيل $\sin\theta_2 > 1$. وهذا يحدث إذا تجاوزت θ_1 الزاوية الحرجة θ_c التي تعطى بـ

$$\sin\theta_C = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{(6-23)}$$

تستعمل العدسة الانكسار لتنتج خيالًا حقيقيًّا أو وهميًّا. تتجمّع الأشعّة المتوازية في نقطة تُسَمّى البؤرة بواسطة عدسة لامّة . ويُسمّى البعدُ بين البؤرة والعدسة **البعدَ البؤريَّ** f للعدسة.

بَعْدَ مرور الأشعّة المتوازية من عدسة **مفرّقة**، تبدو وكأنها تتفرق من نقطة بؤرتها. ويعدّ بُعدها البؤريّ سالبًا.

القدرة P لعدسة والتي تساوي (المعادلة 23-7) $P = 1/f$ تقاس بـ "الديوبتر" وهي وحدة معكوس المتر (m^{-1}).

لجسم ما. موقع الصورة وطوله الناتج من عدسة يمكن إيجادهما بالتقريب برسم الأشعّة. جبريًّا، تُعطى العلاقةُ بين بُعدي الصورة والجسم، d_i، و d_o والبُعد البؤري f بمعادلة العدسة

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(8-23)}$$

نسبة طول الصورة إلى طول الجسم والتي تساوي التكبير m للعدسة، هي

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \qquad \textbf{(9-23)}$$

عند استعمال المعادلات المختلفة للضّوء الهندسيّ من المهمّ أنْ نتذكّر اصطلاح **الإشارات للكميات** جميعها؛ ومراجعته بعناية (الصفحتان 641 و 651) عند حلّ المسائل.

[*عند استعمال عدستين (أو أكثر) كمجموعة للحصول على الصورة، تستعمل معادلة العدسة الرقيقة لكلّ عدسة على الترتيب. الصورة النّاتج من العدسة الأولى يكون كجسم للعدسة التي تليها. **معادلة صانعي العدسات** تربط بين تكوّر كلّ من السّطحين ومعامل انكسار العدسة وبعدها البؤريّ].

أسئلـــة

1. كيف سيكون مظهر القمر لو أنّ له: (أ) سطحًا خَشِنًا؟ (ب) سطحًا مصقولًا كالمرآة؟

2. يُقال إنّ أرخميدس أحرق كامل الأسطول الرومانيّ في خليج سوراكوز بتجميع أشعة الشّمس بواسطة مرآةٍ كرويّةٍ ضخمة. هل هذا معقول؟

3. على الرّغم من أنّ المرآة المستوية تبدو بأنّها تبادل اليمين واليسار إلا أنّها لا تبادل الأعلى والأسفل. فسّر ذلك.

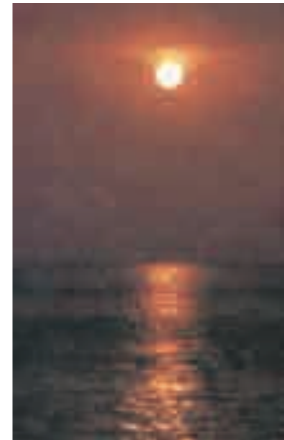
4. إذا كانت المرآة المقعّرة تنتج خيالًا حقيقيًّا، فهل من الضروريّ أن تكون الصورة مقلوبة؟ فسّر.

5. إذا وُضع جسمٌ على امتداد المحور الرئيس لمرآة كروية، وكان تكبير الجسم 3.0–. فهل تكون الصورة حقيقيّة أم وهميّة؟ مقلوبة أم معتدلة؟ وهل المرآة مقعرة أم محدّبة؟ وفي أيّ جانب من المرآة يقع الصورة؟

6. باستخدام القواعد للأشعة الثلاثة التي تمّت مناقشتها بالرجوع إلى (الشّكل 23-13)، ارسم الشّعاع الثّاني (للشّكل 23-17 ب).

7. ما البُعد البؤري لمرآة مستوية؟ وماذا يساوي التكبير لمرآة مستوية؟

8. عندما تنظر إلى انعكاس القمر على سطح بحر متموّج، فإنّه يبدو ممتدًّا (شكل 23-44). علّل ذلك.



الشّكل 23-44 (سؤال 8)

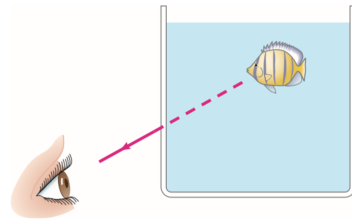
9. ما زاوية الانكسار عندما يُقابل شعاعٌ ضوئيٌّ السّطحَ الفاصلَ بين مادتين عموديًّا؟

10. كيف يمكنك تحديد سرعة الضّوء في جسم صلب، شفاف على شكل متوازي مستطيلات؟

11. عندما تنظر إلى بركة سباحة أو بحيرة، فهل يحتمل أن تقدّر عمقها أقلّ أم أكثر من الواقع؟ فسّر ذلك. كيف يتغير العمق الظاهريّ مع زاوية النظر؟ (استعمل رسمًا للأشعة).

12. ارسم مخطّطًا للأشعة لتبين لماذا تبدو العصا مكسورة إذا وُضع جزء منها تحت الماء (الشّكل 23-21).

13. تنظر عيناك خلال حوض أسماك للزينة لترى سمكة في الداخل. أحد الأشعّة الخارج من الحوض مبين في (شكل 23-45). إضافة إلى الموقع الظاهري للسمكة. بيّن الموقع التقريبيّ للسمكة الحقيقيّة بالرسم. وبرّر إجابتك باختصار.



الشّكل 23-45 (سؤال 13).

14. كيف تستطيع أن "ترى" قطرة ماء على سطح طاولة مع العلم أنّ الماء شفاف وعديم اللون؟

15. عندما تنظر إلى جسم في الهواء من نقطة تحت سطح بركة سباحة، هل سيبدو الجسم بالحجم نفسه كما تراه في الهواء؟ فسّر

16. كيف يكون للمرآة الكروية بعد جسمٍ سالب؟

17. تنحرف الأشعّة الضّوئيّة من النّجوم (بما فيها الشّمس) دائمًا نحو الاتجاه العموديّ في أثناء مرورها في الغلاف الجويّ الأرضي. (أ) لماذا يبدو ذلك معقولًا؟ (ب) ماذا تستنتج من المواقع الظاهرية للنجوم كما تبدو من الأرض؟

18. أين يجب أن يُوضع فيلمٌ إذا كان على عدسة الكاميرا تكوين صورة واضحة لجسم بعيد جدًّا؟

19. ما نوع المرايا المبينة في (الشّكل 23-46)؟ فسّر ذلك.



الشكل 23-46 (سؤال 19)

20. مصوّر يقترب أكثر ممّا يريد تصويره. ثم يعيد ضبط البؤرة (التّبْئير). هل تتحرّك عدسة الكاميرا أقرب إلى الفيلم أم أبعد عنه. فسّر ذلك.

21. هل تستطيع عدسة مفرقة تكوين خيالٍ حقيقيٍ، تحت أيّ ظرف؟ فسّر.

22. استعمل مخطّطاتٍ شعاعيّةٍ لتبيّن أنّ الصورةَ الحقيقيّة النّاتجة من عدسة رقيقة تكون دائمًا مقلوبة. أما الصورة الوهميّ فهو معتدل دائما إذا كان الجسم حقيقيّا.

23. يُقال إنّ الأشعّة الضّوئيّة "عكوسة" هل يتفق ذلك مع معادلة العدسة الرقيقة؟ فسّر ذلك.

24. هل يمكن إسقاط الأخيلة الحقيقيّة على شاشة؟ هل يمكن ذلك للأخيلة الوهمية؟ هل يمكن تصوير أيّهما؟ ناقش ذلك بالتفصيل.

25. قربت عدسة لامّة رقيقة من جسم. فهل يحدث تغير للصورة من حيث (أ) المكان؟ (ب) الطول؟ إذا كان الجواب نعم، فكيف ذلك؟

26. عدسة مصنوعة من مادة معامل انكسارها $n = 1.30$ في الهواء هي عدسة لامّة. هل ستبقى عدسة لامّة إذا وُضِعَتْ في الماء؟ فسّر ذلك باستعمال مخطط أشعة.

27. يواجه كلبٌ عدسة لامّة وذيله في الهواء. إذا تمّ تكوين صورة للأنف والذيل على شاشة على الترتيب، فأيّهما سيكون له تكبيرٌ أكبر؟

28. تقف قطة أمام عدسة محدبة وذيلها في الهواء. تحت أيّ ظروف (إذا وجدت) سيكون خيال الأنف وهميًا وخيال الذيل حقيقيًّا؟ أين سيكون خيال باقي جسم القطة؟

*29. لماذا يكون البُعد البؤريّ للعدسة اللامة في (المثال 23-13) أقلّ من البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة إذا أردنا قياس البعد البؤري للمفرقة عن طريق جمعهما؟

*30. فسّر كيفية الحصول على جسم خيالي.

*31. تكوّن عدسة غير متماثلة (مستوية محدبة) خيالًا لجسم قريب. هل يتغيّر موقع الصورة لو قلبنا العدسة؟

*32. كلّما زاد سمكُ العدسة في الوسط مقارنة بالحواف، كان البعد البؤري أصغر. فسّر ذلك.

*33. تأمّل عدستين لامّتين تفصلهما مسافةٌ ما. وُضِعَ جسمٌ بحيث تقع الصورة النّاتجة من العدسة الأولى في بؤرة العدسة الثانية تمامًا. هل سينتج هذا النظام خيالا؟ إذا كان كذلك فأين؟ وإلا فَلِمَ لا؟

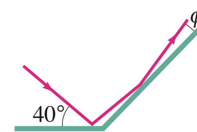
مسائل

23-2 الانعكاس؛ المرايا المستوية

1. (I) إذا أردت التقاط صورة لنفسك عند نظرك لخيالك في مرآة مستوية تبعد $2.5\ \mathrm{m}$ عنك. فعلى أيّ بعدٍ يجب ضبط عدسة الكاميرا؟

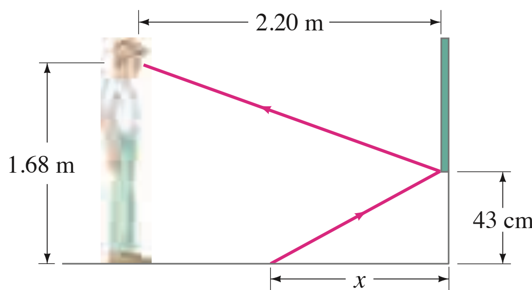
2. (I) عندما تنظر إلى نفسك في مرآة مستوية طولها 60-cm، فسترى المقدار نفسه من جسمك سواء كنت قريبًا أو بعيدًا عنها. (جرّب ذلك). استعمل مخطط أشعة لتبين كيف يكون ذلك حقيقيا.

3. (II) تتقابل مرآتان بزاوية 135°، الشّكل (23-47). إذا سقطت أشعة ضوئية على إحدى المرآتين بزاوية 40° كما هو مبين. فبأيّ زاوية ϕ سوف تغادر الأشعّة المرآة الثانية.



الشّكل 23-47 (مسألة 3).

4. (II) شخص ارتفاع عينيه عن الأرض $1.68\ \mathrm{m}$. يقف على بُعد $2.20\ \mathrm{m}$ أمام مرآة عمودية ترتفع حافتها السفلية عن الأرض $43\ \mathrm{cm}$. (الشّكل $48 - 23$). ما المسافة الأفقية x إلى قاعدة الجدار الذي يحمل المرآة لأقرب نقطة من أرض الغرفة يراها تنعكس في المرآة؟



الشّكل 23-48 (مسألة 4)

5. (II) افرض أنّك على بعد 90 cm من مرآة مستوية. ما المسافة بين المرآة التي تستعمل لعكس الأشعّة لتدخل في إحدى العينين ورأس أنفك إذا كان قطر البؤبؤ 5.5 mm؟

6. (III) بين أنّه إذا التقت مرآتان مستويتان بزاوية ϕ، فإنّ شعاعاً ينعكس على التتابع عن المرآتين سينحرف بزاوية 2ϕ بغضّ النظر عن زاوية السّقوط. افرض أنّ $\phi < 90°$ وأنّ هناك انعكاسين فقط، واحد عن كلّ مرآة.

3-23 المرايا الكروية

7. (I) سخّان شمسيّ حقيقة هو مرآة مقعرة موجهة نحو الشّمس. تجمع أشعّة الشمس في نقطة على بعد 18.0 cm أمامها. ما نصف قطر الكرة التي صنعت منها المرآة؟

8. (I) على أيّ بعدٍ من مرآة مقعرة (نصف قطر تكورها 23.0 cm) يجب وضع جسم ليتكون خياله في اللانهاية؟

9. (II) إذا نظرت إلى نفسك في كرة لامعة لشجرة عيد ميلاد قطرها 9.0 cm عندما يكون وجهك على بعد 30.0 cm منها. فأين سيكون خيالك؟ هل هو حقيقيّ أم وهميّ؟ هل سيكون معتدلا أم مقلوبًا؟

10. (II) مرآة في مدينة ألعاب ترويحية تعطي صورة معتدلة لأيّ شخص يقف على بعد 1.4 m منها. إذا كان طول الصورة ثلاثة أمثال طول الشّخص، فما نصف قطر التّكوّر؟

11. يريد طبيب أسنان استعمال مرآة صغيرة، بحيث عندما تكون على بعد 2.20 cm من السّنّ تنتج خيالا × 4.5 معتدلا. أيّ نوع من المرايا يجب أن يستعمل؟ وما نصف قطر تكورها؟

12. (II) تظهر مرايا المنظر الخلفيّ في السّيارة خيالا للسيارات خلفك أصغر من الصورةات التي تكوّنها لو كانت مستوية. فهل هذه المرايا مقعّرة أم محدّبة؟ ما نصف قطر تكورها إذا كانت السيارة على بعد 20.0 m منها تبدو × 0.33 طولها الحقيقيّ؟

13. (II) وُضِع جسمٌ مضيءٌ ارتفاعُه 3.0 mm على بعد 20.0 cm. أمام مرآة محدّبة نصف قطر تكوّرها 20.0 cm (أ) بيّن بواسطة المخطّط الشّعاعيّ أنّ بعد الصورة وهميّ، واحسب بعد الصورة. (ب) بين أنّ البعد (السالب) للخيال يمكن حسابه من (المعادلة 23-2) باستعمال بُعدٍ بؤريّ قدره 10.0 cm-. (جـ) احسب طول الصورة. (المعادلة 23-3).

14. (II) إذا وقفت على بعد 3.0 m من مرآة محدّبة في محلٍّ تجاريّ. وقدّرت ارتفاع خيالك بنصف طولك الأصليّ. فاحسب نصف قطر التكوّر للمرآة.

15. (II) (أ) أين يجب وضع جسمٍ أمام مرآة مقعّرة بحيث تتكوّن الصورة في موقع الجسم نفسه؟ (ب) هل الصورة حقيقيّة أم وهميّة؟ (جـ) هل الصورة مقلوبة أم معتدلة؟ (د) احسب تكبير الصورة.

16. (II) خيال شجرة بعيدة وهميّ وصغير جدًّا ناجٌ من مرآة منحنية. تبدو الصورة على بعد 18.0 cm خلف المرآة. ما نوع هذه المرآة؟ وما نصف قطر تكورها؟

17. (II) استعمل طريقتين مختلفتين: الرسم الشّعاعيّ، ومعادلة المرآة لتبين أنّ تكبير المرآة المقعرة أقلّ من 1 إذا كان الجسم خارج مركز التكور $C\ (d_o > r)$، وأكبر من 1 إذا كان الجسم داخل مركز التكور $C\ (d_o < r)$.

18. (II) بين باستعمال مخطّط الأشعّة أنّ التكبير m لمرآة محدبة هو $m = -d_i/d_o$، تمامًا مثل مرآةٍ مقعّرة. (مساعدة: افرض شعاعًا من قمّة الجسم ينعكس عند مركز المرآة).

19. (II) استعمل مخطّطات الأشعّة لتبيّن أنّ معادلة المرآة. (المعادلة 23-2). تنطبق على مرآة محدبة ما دمنا نستعمل f سالبة.

20. (II) تكبير مرآة محدبة يساوي × 0.65 + لأجسام على بعد 2.2 m من المرآة. ما البعد البؤري للمرآة؟

21. (II) جسمٌ طولُه 4.5 cm موضوعٌ على بعد 28 cm أمام مرآة كرويّة. نحتاج إلى تكوين خيال وهمي معتدل طوله 3.5 cm. (أ) ما نوع المرآة التي سوف نستعملها؟ (ب) أين سيكون الصورة؟ (جـ) ما البعد البؤري للمرآة؟ (د) ما نصف قطر تكوّرها؟

22. (III). مرآة حلاقة مصمّمة لتكبير الوجه بمعامل 1.33 عند وضع الوجه على بعد 20.0 cm أمامها. (أ) أيّ نوع من المرايا هي؟ (ب) صِفْ نوع الصورة الذي تكوّنه للوجه. (جـ) احسب نصف قطر التكور للمرآة المطلوبة.

4-23 معامل الانكسار

23. (I) ما سرعة الضّوء في: (أ) الزّجاج التاجي؟ (ب) الليوسيت؟ (جـ) كحول الإيثايل؟

24. (I) تساوي سرعة الضّوء في الجليد 2.29×10^8 m/s. ما معامل انكساره ؟

25. (II) سرعة الضّوء في مادة ما 89% من قيمتها في الماء. ما معامل انكسارها؟

5-23 الانكسار: قانون سنيل

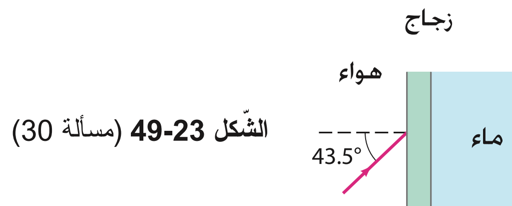
26. (I) تسقط حزمة ضوئيّة على سطح مستوٍ من الزّجاج (n= 1.58) وبزاوية 36° مع العموديّ. ما قيمة زاوية الانكسار؟

27. (I) يسلّط غواص حزمة ضوئيّة نحو الأعلى من تحت سطح الماء. وبزاوية 42.5° مع العموديّ. عند أيّ زاوية يخرج الشّعاع من سطح الماء؟

28. (I) شعاعٌ ضوئيٌّ صادرٌ من مصدرٍ تحت الماء ويخرج من سطح الماء بزاوية 66.0° مع العموديّ. عند أيّ زاوية سقوط يسقط الشّعاع على الحدّ الفاصل بين الهواء والماء من تحت السّطح؟

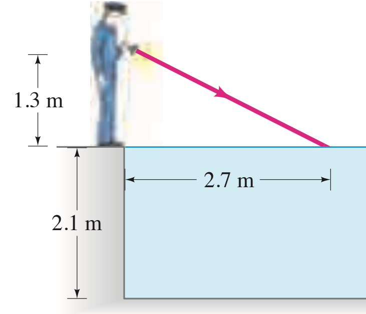
29. (I) تُشاهَدُ أشعة الشّمس بأنّها تصنع زاوية 31.0° مع العموديّ تحت سطح الماء. عند أيّ زاوية مع الأفق تقع الشّمس؟

30. (II) حوض مائيّ مملوء بالماء ذو سطوح جانبية زجاجيّة معامل انكسارها 1.52. وهناك شعاع ضوئيّ من خارج الحوض يسقط على الزّجاج بزاوية 43.5° مع العموديّ (الشّكل 23-49). ما زاوية هذا الشّعاع الضّوئيّ عندما يدخل: (أ) الزّجاج؟ (ب) الماء؟ وماذا ستكون زاوية الانكسار إذا دخل هذا الشّعاع الماء مباشرة؟



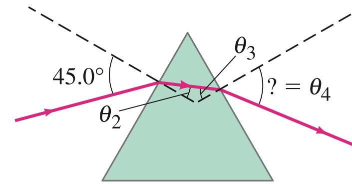
الشّكل 23-49 (مسألة 30)

31. (II) عند البحث في قاعدة بركة في الليل، يسلّط مراقب شعاعًا رفيعًا من الضّوء من ارتفاع 1.3 m على سطح الماء عند نقطة تبعد 2.7 m من حافة البركة (الشّكل 23-50). أين تصطدم بقعة الضّوء بقعر البركة، مقاسًا من الجدار تحت قدم المراقب إذا كان عمق البركة 2.1 m؟



الشّكل 23-50 (مسألة 31)

32. (II) يسقط الضّوء على منشور زجاجيّ متساوي الأضلاع بزاوية 45° مع أحد أوجهه، (الشّكل 23-51). احسب الزاوية التي يخرج بها الشّعاع من الوجه المقابل افرض أنّ $n = 1.58$.



الشكل 23-51 (المسألتان 32 و 40)

33. (II) يسقط شعاع ضوئيّ في الهواء على صفيحة من الزّجاج ($n = 1.52$) حيث ينعكس جزءٌ منه، في حين ينكسر الجزء الآخر. احسب زاوية السّقوط إذا كانت زاوية الانعكاس ضعف زاوية الانكسار.

34. (II) برهن بصورةٍ عامّةٍ أنّه لشعاع ضوئيّ يسقط على سطح صفيحة من مادة شفافة، كما في الشّكل 23-22، فإنّ اتجاه الشّعاع الخارج يكون موازيًا للشّعاع السّاقط، بغضّ النظر عن زاوية θ السّقوط . افرض وجود الهواء على جانبي الصفيحة.

35. (II) يسقط شعاعٌ ضوئيٌّ على سطح صفيحةٍ زجاجيّةٍ معامل انكسارها n كما في (الشّكل 23-22). بيّن أنه إذا كانت زاوية السّقوط صغيرة، فإنّ الشّعاع الخارج يزاح جانبيًّا مسافة $d = t\theta(n-1)/n$ عن الشّعاع السّاقط، حيث t سمك الزّجاج θ وبالراديان. (مساعدة: للزاوية الصغيرة θ. $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$)

23-6 الانعكاس الداخليّ الكليّ

36. (I) ما الزّاوية الحرجة عند السّطح الفاصل بين الماء واللّيوسيت؟ وفي أيّ مادة يجب أن يبدأ الضّوء كي يحدث الانعكاس الداخليّ الكليّ؟

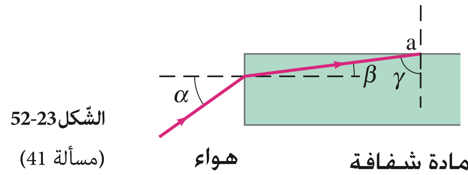
37. (II) الزّاوية الحرجة عند سطح سائلٍ ما مع الهواء تساوي 47.7°. احسب معامل انكسار السّائل.

38. (II) أُطلق شعاعٌ ضوئيٌّ من تحت سطح بركة ماء على عمق 62 m. أين يجب أن يصطدم بالحدّ الفاصل بين الماء والهواء بالنسبة للنقطة فوقه مباشرة بحيث لا يخرج الضّوء من سطح الماء؟

39. (II) ينبعث شعاع ضوئيّ من نقطة على عمق 8.0 cm تحت سطح سائل، ويصطدم بالسّطح عند نقطة على بعد 7.0 cm من النقطة التي فوق المصدر مباشرة. إذا حدث انعكاس داخلي كليّ، فماذا تقول عن معامل انكسار السائل؟

40. (II) افرض شعاعًا ضوئيًّا يسقط على الوجه الأيسر للمنشور في (الشّكل 23-51). بزاوية 45.0° كما هو مبين، ولكنه انعكس كليّا على السّطح المقابل. إذا كانت زاوية رأس المنشور $\phi = 75.0°$، فماذا تقول عن معامل انكسار المنشور؟

41. (II) يدخل شعاع ضوئيّ نهاية أحد الألياف الضّوئيّة (الشّكل 23-52). بيّن أننا نضمن انعكاسا كليّا على السّطح (عند النقطة (a)) إذا كان معامل الانكسار نحو 1.52. أي أنّ الضّوء ينعكس داخليا عند النقطة a بغض النظر عن الزاوية α.



الشّكل 23-52 (مسألة 41)

42. (II) (أ) ما أقلّ قيمة لمعامل انكسار منشور زجاجيّ أو بلاستيكيّ يستعمل في منظار (الشّكل 23-26) بحيث يحصل انعكاس داخليّ كليّ عند زاوية 45°؟ (ب) هل سيعمل المنظار ($n = 1.50$) لو وُضع تحت سطح الماء؟ (جـ) ما أقلّ معامل انكسار مطلوب إذا غُمِر المنظار في الماء؟

23 – 7، و 23 – 8 العدسات الرّقيقة

43. (I) يقع خيال واضح عند 78.0 mm خلف عدسة لامّة بعدها البؤريّ 65.0 mm. جدْ موقع الجسم باستعمال: (أ) مخطّط شعاعيّ. (ب) الحساب.

44. (I) لوحظ أنّ أشعة الشّمس تتجمع عند نقطة 18.5 cm خلف عدسة. (أ) ما نوع العدسة؟ (ب) ما قدرة العدسة بالديوبتر؟

45. (I) تجمع عدسة الضّوء من جسم يبعد عنها 2.75 m في خيال يبعد 48.3 cm في الجهة الأخرى من العدسة. ما نوع العدسة؟ ما هو بعدها البؤري؟ هل الصورة حقيقيّ أم وهميّ؟

46. (I) (أ) ما قدرة عدسة بعدها البؤري 20.5 cm؟ (ب) ما البعد البؤري لعدسة قدرتها 6.25 – ديوبتر؟ (جـ) ما نوع هاتين العدستين؛ لامتان أم مفرقتان؟

47. (II) يستعمل جامع طوابع عدسة لامة بعدها البؤري 24 cm لمشاهدة طابع على بعد 18 cm أمام العدسة. (أ) أين يقع الصورة؟ (ب) ما التكبير الناتج؟

48. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ قدرتها ‎-5.5 D‎ على بعد ‎14.0 cm‎ من جسم طوله ‎4.0 mm‎. ما هو: الموقع؟ النوع؟ ارتفاع الصورة؟

49. (II) تُستخدمُ عدسةٌ بعدُها البؤري ‎80 mm‎ لتكوين خيالٍ لجسمٍ على فيلم كاميرا. أكبرُ مسافةٍ مسموحةٍ بين العدسة والفيلم هي ‎120 mm‎. ما بعد العدسة أمام الفيلم إذا كنّا نصوّر جسمًا يبعد عن العدسة: (أ) ‎10.0 m‎ ؟ (ب) ‎3.0 m‎؟ (جـ) ‎1.0 m‎؟ وما أقربُ جسمٍ يمكن لهذه العدسة أن تصوّره بوضوح؟

50. (II) يُراد تكبيرُ مادة للقراءة بمعدّل ‎2.5×‎ عند وضع الكتاب على بعد ‎8.0 cm‎ خلف عدسة. (a) ارسم مخطّطا شعاعيًّا، وصِفْ نوعَ الصورة الذي نحصل عليه. (ب) ما نوع العدسة التي نحتاج إليها؟ (جـ) ما قدرة العدسة بـالديوبتر؟

51. (II) وُضع جسم على بعد ‎1.5 m‎ أمام عدسة قدرتها ‎8.0 D‎. ما المسافة التي يتحرّكها الصورة إذا تحرّك الجسم: (أ) ‎1.0 m‎ نحو العدسة؟ (ب) ‎1.0 m‎ بعيدًا عن العدسة؟

52. (II) على أيّ بعد من عدسة لامّة بعدها البؤريّ ‎25 cm‎ يوضع جسم للحصول على خيال حقيقيّ له طول الجسم نفسه؟

53. (II) (أ) ما بُعْدُ الجسمِ عن عدسةٍ لامّةٍ، بعدُها البؤريُّ ‎50.0-mm‎ إذا أردنا الحصول على خيال مكبر ‎2.00×‎ وحقيقي؟ (ب) ماذا سيكون الجواب لو كان الصورة وهميًا ومكبرًا ‎2.00×‎؟

54. (II) أعِدْ حلّ (المسألة 53) بعدسة بعدها البؤريّ ‎-50.0 mm‎. [مساعدة: افرض أجسامًا حقيقيّةً أو وهميّةً (مكونة من أدوات ضوئية أخرى)].

55. (II) (أ) حشرة طولها ‎2.00 cm‎ على بعد ‎1.20 m‎ من عدسة بعدها البؤري ‎135 mm‎. أين سيكون الصورة؟ ما طوله؟ ما نوعه؟ (ب) ماذا لو كانت $f = -135\ \text{mm}$؟

56. (II) جِدِ البعدَ بين الجسم والصورة المتكوّن بواسطة عدسة لامّة بعدها البؤريّ ‎75 cm‎ إذا كان الصورة حقيقيّا ومكبرًا ‎2.5×‎ قدر الجسم.

57. (II) البعد بين جسم لامع وشاشة عرض هو ‎66.0 cm‎. في أيّ موقع (أو مواقع) بين الجسم والشاشة توضع عدسة بعدها البؤريّ ‎12.5 cm‎ بحيث تنتج خيالا واضحا على الشّاشة؟ [مساعدة: ارسم مخطّطا عند البدء].

23-9 تراكيب العدسات*

*58. (II) عدستان لامّتان: البعد البؤريّ لكلٍّ منهما ‎28.0 cm‎ تفصلهما ‎16.5 cm‎. وُضع جسمٌ على بعد ‎36.0 cm‎ أمام إحداهما. أين يقع الصورة النهائي المكوّن بالعدسة الثانية؟ جِدِ التكبيرَ الكليّ؟

*59. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ مفرقة بعدها البؤريّ $f = -31.5\ \text{cm}$ على بعد ‎14.0 cm‎ خلف عدسة لامة بعدها البؤريّ $f = 20.0\ \text{cm}$. أين سيكون خيال جسم موضوع في اللانهاية؟

*60. (II) عدسةٌ لامّةٌ بعدُها البؤريُّ ‎31.0 cm‎، وُضِعَتْ على بُعد ‎21.0 cm‎ خلف عدسة مفرقة. تسقط أشعة ضوئيّة متوازية على العدسة المفرّقة. بعد مرور الأشعّة من العدسة اللامة، تخرج متوازية مرة أخرى. احسب البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة؟ [مساعدة: ارسم مخطّطًا شعاعيًّا عند البدء].

*61. (II) العدستان اللّامتان في (المثال 23-12) وضعتا الآن فقط على بعد ‎20.0 cm‎ بينهما. الجسم لايزال على بعد ‎60.0 cm‎ أمام العدسة الأولى كما في (الشّكل 23-41). في هذه الحالة، حدّد كلا من: (أ) موقع الصورة النهائي. (ب) التكبير الكلّيّ. وارسم المخطَّطَ الشّعاعيّ لهذا النظام.

*62. (II) عدستان لامّتان وضعتا والبعد بينهما ‎30.0 cm‎. البعد البؤريّ للعدسة إلى اليمين ‎20.0 cm‎، والبعد البؤريّ للعدسة إلى اليسار ‎15.0 cm‎. وُضع جسمٌ إلى يسار العدسة ذات البعد البؤريّ ‎15.0- cm‎. فتكوّن خيال نهائيّ من العدستين، وكان مقلوبا، وفي نقطة عند منتصف المسافة بين العدستين. ما بُعد الجسم الذي إلى يسار العدسة ذات البعد البؤريّ ‎15.0-cm‎؟

*63. (II) وُضعت عدسة مفرقة بعدها البؤري ‎14 cm –‎ على بعد ‎12 cm‎ إلى يمين عدسة لامة بعدها البؤريّ ‎18 cm‎. ووُضع جسم على بعد ‎33 cm‎ إلى يسار العدسة اللامة. (أ) أين سيكون الصورة النهائي؟ (ب) أين سيكون الصورة لو كانت العدسة المفرّقة على بعد ‎38 cm‎ من العدسة الجمعة؟

*64. (II) عدستان: إحداهما لامّة ‎(20.0 cm)‎ والأخرى مفرّقة ‎(– 10.0 cm)‎. وضعتا متباعدتين بـ ‎25.0 cm‎. وُضع جسمٌ على بعد ‎60.0 cm‎ أمام العدسة اللامة. حدّد كلًّا من: (أ) الموقع. (ب) التكبير للخيال النهائي الناتج. وارسم مخطّطًا شعاعيًّا لهذا النظام.

*65. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ مفرقة بجانب عدسة لامّة بعدها البؤري f_C. كما في (الشّكل 23-42). إذا كان f_T هو البعد البؤري للمجموعة. فبيّن أنّ البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة f_D يعطى بـ:

$$\frac{1}{f_D} = \frac{1}{f_T} - \frac{1}{f_C}$$

23-10 معادلة صانعي العدسات*

*66. (I) عدسةٌ مقعّرةُ الوجهين، نصفا قطري تكور سطحيها ‎34.2 cm‎ و ‎23.8 cm‎. ما بعدها البؤريّ إذا كانت $n = 1.52$؟

*67. (II) نصف قطر كل من سطحي عدسة محدّبة الوجهين يساوي ‎31.0 cm‎. إذا كان البعد البؤريّ ‎28.9 cm‎. فما معامل الانكسار لمادة العدسة؟

*68. (II) عدسة مستوية مقعرة $(n = 1.50)$ بعدها البؤري ‎23.4 cm -‎. ما نصف قطر تكور سطحها المقعر؟

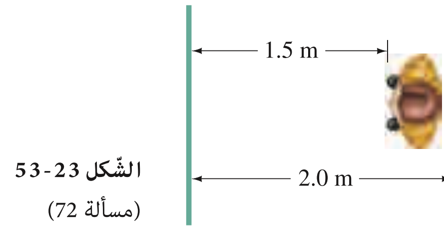
*69. (II) عدسة ليوسيت مستوية – محدّبة (انظر الشّكل 23-29 ب) لها سطحٌ مستوٍ وآخر له $R = -18.4\ \text{cm}$. ما بعدها البؤريّ؟

*70. (II) لعدسة متماثلة التحدّب بُعدُ بؤريّ ‎25.0 cm‎. يُراد صنعها من زجاج معامل انكساره ‎1.52‎. ماذا سيكون نصف قطر التّكوّر لكلّ سطح؟

*71. (II) تعليماتٌ لعدسةٍ تصحيحيّةٍ تطلب ‎+1.50 D‎. صانع العدسة ينحتها من "خام" معامل انكساره $n = 1.56$ وسطح أمامي محدب نصف قطر تكوره ‎40.0 cm‎. ماذا سيكون نصف قطر تكوّر السّطح الثاني؟

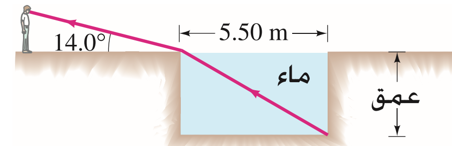
مسائل عامة

72. مرآتان مستويتان متقابلتان، والبعد بينهما 2.0 m كما في (الشّكل 23-53). إذا وقفتَ على بُعد 1.5 m من إحداهما ونظرت إليها، فسترى أخيلة متعددة لنفسك. (أ) ما بعد أول ثلاثة أخيلة عنك؟ (ب) هل أوجه هذه الأخيلة الثلاثة الأولى نحوك أم بعيدًا عنك؟



الشّكل 23-53
(مسألة 72)

73. نريد قياس عمق بركة سباحة مملوءة بالماء. قسنا عرضها ($x = 5.50$ m) ولاحظنا أنّ حافة البركة السفلية تبدو مرئية عند زاوية $14.0°$ فوق الأفق كما هو مبين في (الشّكل 23- 54). احسب عمق البركة.

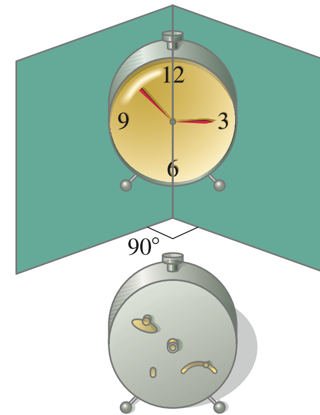


الشّكل 23-54. (مسألة 73)

74. إذا كانت الزاوية الحرجة لقطعة بلاستيك في الهواء تساوي $\theta_C = 37.3°$. فما الزاوية الحرجة للقطعة نفسها لو غُمرت في الماء.

75. (أ) المرآة المستوية يمكن اعتبارها حالة حدّيّة من المرآة الكروية. حدّد ما هذه الحالة الحدّية. (ب) جدْ معادلة تربط بين بُعدي الجسم والصورة عن المرآة المستوية في هذا الحدّ. (جـ) جِدِ التكبيرَ للمرآة المستوية. عند هذه الحالة الحدّيّة. هل تتفق نتائجك في الجزأين ب. جـ مع المناقشة في (البند 23 - 2) عن المرايا المستوية؟

76. تقف مرآتان مستويتان بحيث تصنعان معًا زاوية قائمة $90°$ كما في (الشّكل 23 - 55). عندما تنظر في هذه المرآة المزدوجة، فإنّك ترى نفسك كما يراك الآخرون. بدلا من أن يكون الصورة معكوسًا كما في المرآة المتفردة. ارسم بعناية تخطيطًا شعاعيًا لتبين كيفية حصول ذلك.

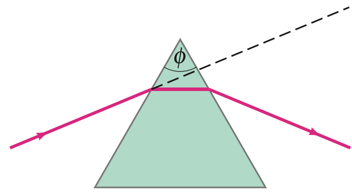


الشّكل 23-55 (مسألة 76)

77. بيّن تحليليًّا (حسابيًّا) أنّ العدسة المفرّقة لا يمكن أن تكوّن خيالا حقيقيًّا لجسمٍ حقيقيٍّ. هل يمكن أن تصف وضعًا تنتج فيه العدسة المفرّقة خيالا حقيقيّا؟

78. طُلِبَ إلى كلّ طالب في مختبر الفيزياء إيجاد مكان الجسم المضيء بحيث تنتج مرآة مقعرة نصف قطر تكورها $r = 40$ cm خيالا مكبّرًا ثلاث مرّات. أنجز طالبان المهمّة في وقتين مختلفين واستعملا أدوات متماثلة، ولكن عندما قارنّا ملاحظاتهما لاحقًا، اكتشفا أنّ إجابتيهما لبعد الجسم غير متشابهتين. فسّر سبب عدم حاجتهما إلى إعادة التجربة، وبرّر استجابتك بعمليّة حسابيّة.

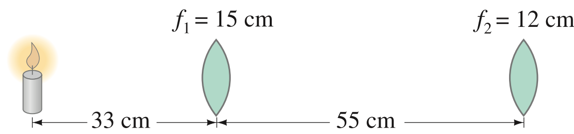
79. إذا كانت زاوية رأس منشور $\phi = 72°$ (انظر الشّكل 23-56). فما أقلّ زاوية سقوط لشعاع إذا كان على الشّعاع الخروج من الوجه المقابل (لا ينعكس انعكاسًا داخليًّا كليًّا)، علمًا أنّ $n = 1.50$؟



الشّكل 23-56 (المسألة 79)

80. وجها النهايتين لقضيب زجاجيّ أسطوانيّ عموديّان على الجوانب ($n = 1.54$). بين أنّ شعاعًا يدخل عند أيّ من النهايتين، وبأيّ زاوية سوف ينعكس انعكاسًا داخليًّا كليًّا على الجوانب. افرض أنّ القضيب في الهواء. ماذا يحصل لو كان القضيب في الماء؟

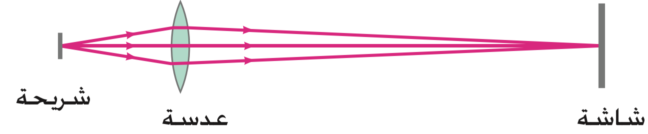
81.* وُضِعَت شمعةٌ مضيئةٌ على بعد 33 cm من عدسةٍ لامّة بعدها البؤري $f_1 = 15$ cm، والتي بدورها تبعد 55 cm أمام عدسة أخرى لامّة بعدها البؤريّ $f_2 = 12$ cm، (انظر الشّكل 23-57). (أ) ارسم مخطّطًا شعاعيًّا، وخمّن الموقع والطول النسبيّ للخيال النهائيّ. (ب) احسب الموقع والطول النسبيّ النهائيّ لهذه الصورة.



الشّكل 23-57 (المسألة 81)

82. وُضعَ جسمٌ مضيء على أحد جانبي عدسة لامّة بعدها البؤري f وشاشة بيضاء لمشاهدة الصورة على الجانب الآخر. ظلّت المسافةُ $d_T = d_i + d_o$ بين الجسم والشاشة ثابتةً، ولكن العدسة يمكن تحريكها. (أ) بين أنه إذا كانت $d_T > 4f$، فسيكون هناك مكانان يمكن وضع العدسة فيهما مع إنتاج خيال واضح على الشاشة. (ب) إذا كانت $d_T < 4f$، فبيّن أنّه لايوجد أيّ مكان يمكن وضع العدسة فيه بحيث تكوّن خيالًا واضحًا. (جـ) جدْ علاقة للبعد بين موقعي العدسة. في البند (أ). والنسبة بين طولي الصورتين.

83. في جهاز عرض سينمائيّ يعمل الفيلم كجسمٍ يتكوّن خياله على شاشة (الشّكل 23-58). إذا استعملت عدسة بعدها البؤريّ 105 mm لتسقط خيالًا على شاشة تبعد 8.0 m فعلى أيّ بعد من العدسة يجب أن تكون الشريحة؟ إذا كان عرض الشريحة 36 mm فما عرض الصورة على الشاشة؟



الشّكل 23-58. (مسألة 83)

84. شريحة 35 mm (أبعاد الصورة عادة 36×24 mm) يراد إسقاطها على شاشة أبعادها 1.80×2.70 m. موضوعة على بعد 7.50 m من جهاز العرض. ما البعد البؤريّ للعدسة المستعملة إذا كان على الصورة تغطية الشاشة؟

85. بيّن بالتحليل أنّ الصورة المتكوّن بعدسة لامّة يكون حقيقيًّا ومقلوبًا إذا كان الجسم أبعد من البؤرة ($d_o > f$) ويكون وهميّا ومعتدلًا إذا كان الجسم أقرب من البؤرة ($d_o < f$). صِفِ الصورةَ إذا كان الجسم هو نفسه خيالا ناجًا من عدسة أخرى بحيث إنّ موقعه خارج العدسة: أي $-d_o > f$ و $0 < -d_o < f$.

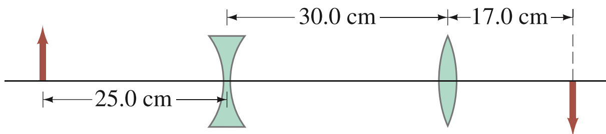
86. ضبطت نجمة سينمائية مصورًا يلتقط لها صورًا في البيت. ادعت أنّ المصور كان ينتهك حرمة بيتها. ولاثبات حجتها؛ قدمت الفيلم الذي وضعت يدها عليه كدليل. كان طولها البالغ. 8.25 mm (1.75 m) على الفيلم. والبعد البؤريّ لعدسة الكاميرا 210 mm. فعلى أيّ بعد منها كان المصور واقفًا؟

87. ما طول خيال الشّمس على فيلم كاميرا بـ: (أ) عدسة بعدها البؤريّ 28 mm؟ (ب) عدسة بعدها البؤريّ 50 mm؟ (جـ) عدسة بعدها البؤري 135 mm؟ (د) إذا اعتبرت العدسة 50 mm طبيعية لهذه الكاميرا. فما التكبير النسبيّ لكلّ من العدستين الأخريين؟ قطر الشّمس 1.4×10^6 km وبعدها 1.5×10^8 km.

88. (أ) جسم على بعد 34.5 cm أمام عدسة معينة. تكوّن له خيال أمام العدسة على بعد 8.20 cm (على جانب الجسم نفسه). ما نوع هذه العدسة؟ ما بعدها البؤريّ؟ هل الصورة حقيقيّ أم وهميّ؟ (ب) إذا كان موقع الصورة على بعد 41.5 cm أمام العدسة. فما نوع العدسة عندها؟ وما هو بعدها البؤريّ؟

89. عند وضع جسم على بعد 60.0 cm من عدسة لامّة. كوّنتْ له خيالًا حقيقيًّا. وعند تحريك الجسم 40.0 cm من العدسة. تحرّك الصورة 10.0 cm أبعد عن العدسة. احسب البعد البؤريّ للعدسة.

90. جسمٌ صغيرٌ على بعد 25.0 cm من عدسة مفرقة كما هو مبين في (الشّكل 23-59). وُضعت عدسة لامّة بعدها البؤريّ 12.0 cm على بعد 30.0 cm إلى يمين العدسة المفرّقة. كوّن هذا النظام من العدستين خيالًا حقيقيًّا مقلوبًا على بعد 17.0 cm إلى يمين العدسة اللامّة. ما البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة؟



الشّكل 23-59 (مسألة 90)

91. وُضع جسم على بعد 15 cm من مرآة معيّنة. كان الصورة نصف طول الجسم. مقلوبا وحقيقيا. ما بعد الصورة عن المرآة؟ وما نصف قطر تكوّرها؟

92. (أ) بيّن أنه يمكن كتابة معادلة العدسات بصيغة نيوتن

$$xx' = f^2$$

حيث x بعد الجسم عن البؤرة في الجهة الأمامية للعدسة. و x' هو بعد الصورة عن البؤرة من الجانب الآخر للعدسة. احسب موقع الصورة إذا وُضع الجسم على بعد 45.0 cm أمام عدسة محدبة بعدها البؤريّ $f = 32.0$ cm باستعمال (ب) الشّكل العادي لمعادلة العدسات (جـ) الصيغة النيوتونية المذكورة آنفًا.

***93.** وُضعتْ عدسة لامّة بعدها البؤريّ 10.0 cm ملامسة لعدسة مفرقة بعدها البؤريّ -20.0 cm. ما البعد البؤريّ للمجموعة؟ هل هذه المجموعة لامّة أم مفرقة؟

***94.** (أ) بيّن أنه إذا وضعت عدستان رقيقتان. بعداهما البؤريان f_1 ,f_2 متلاصقتين. فإنّ البُعدَ البؤريّ للمجموعة يعطى بالعلاقة $f_T = f_1 f_2/(f_1 + f_2)$ (ب) أثبت أنّ القدرة P للمجموعة من العدستين هي مجموع قدرتيهما P_1, P_2 أي $P = P_1 + P_2$.

إجابات التمارين

أ: لا

ب: نعم. لمرآة مستوية $r = \infty$ لذلك $f = \infty$. وعندما (المعادلة 23-2) تعطي $1/d_o + 1/d_i = 0$ أو $d_i = -d_o$

ج: مقتربًا منه.

د: لا يوجد

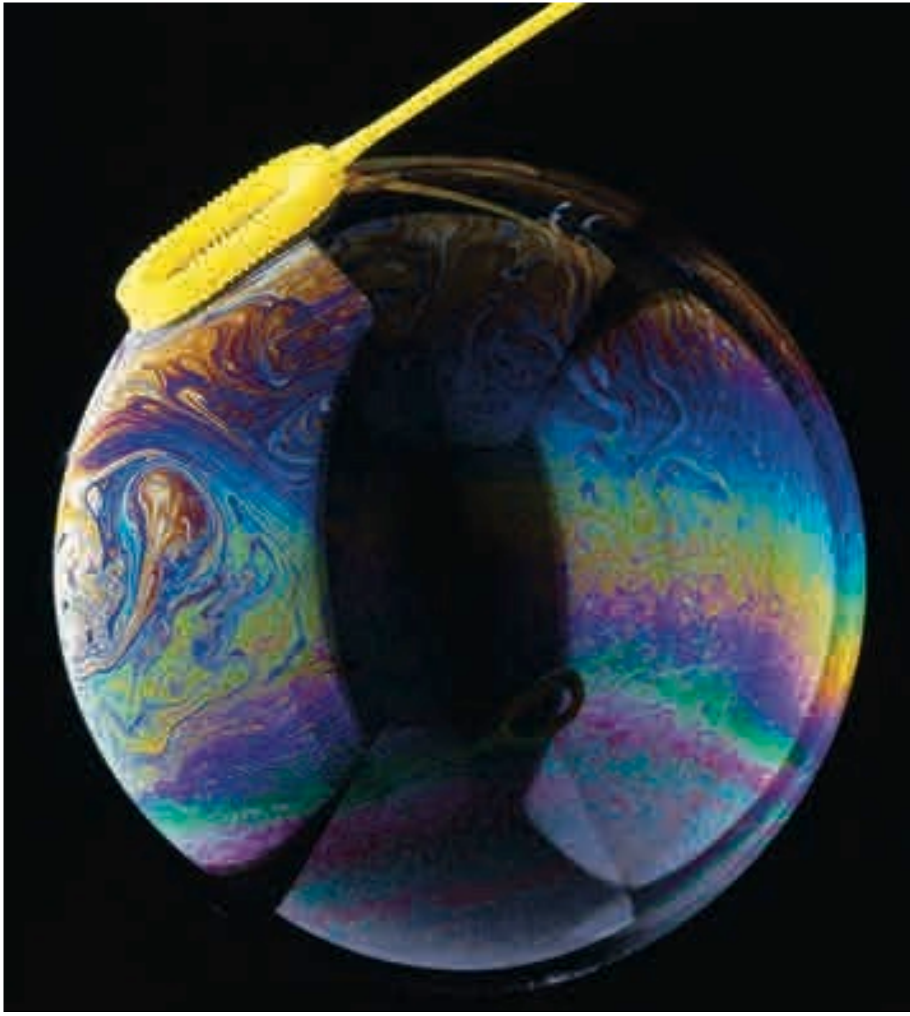
هـ: 1.414

و: ليس هناك انعكاسٌ داخليٌّ كلّيٌّ $\theta_C > 45°$

ز: أقرب إليها

ر: (أ) خياليّ. (ب) خياليّ.

ي: -97.5 cm (أي على بعد 97.5 cm أمام العدسة)



يمكن تفسير الألوان الجميلة المشاهدة من سطح فقاعة الصابون هذه بطريقة بديعة بالنّظريّة الموجيّة للضَّوء. إنّ فقاعة الصابون هي غشاء كروي رقيق مملوء بالهواء؛ الضَّوء المنعكس على السطحين الخارجي والداخلي لهذا الغشاء من الماء الصابوني يتداخل تداخلا بناءً لإنتاج الألوان البراقة. وأيّ لون نراه عند أيّ نقطة يعتمد على سمك الغشاء عند تلك النّقطة، وعلى زاوية النظر أيضًا.

سندرس في هذا الفصل مفاهيم أساسية لطبيعة الضَّوء الموجيّة، بما في ذلك التّداخل، والحيود، وتداخل الأغشية الرقيقة، والاستقطاب. بالإضافة إلى الكثير من التطبيقات من القياسات الطّيفية، إلى شاشات عرض LCD.

الفصل 24

الطّبيعة الموجيّة للضَّوء

إنّ حمل الضَّوء لطاقة هو شيء واضح لكلّ شخص جمّع أشعة الشّمس بعدسة لامّة على قطعة من الورق وحرق فجوة فيها. ولكن كيف ينتقل الضَّوء؟ وبأيّ شكل تُحمل هذه الطّاقة؟ في مناقشتنا للموجات في (الفصل 11)، لاحظنا أنّ الطّاقة يمكن حملها من مكان إلى آخر بطريقتين هما: الجسيمات، والموجات. في الحالة الأولى، يمكن أن تحمل الجسيماتُ المادية الطّاقةَ مثل الماء المتدفق. وفي الحالة الثانية، موجات الماء وموجات الصّوت، مثلا، يمكن أن تحمل الطّاقة لمسافات بعيدة مع أنَّ جُسيمات الوسط المهتز لا تقطع هذه المسافات. واستنادًا إلى ذلك، ماذا يمكننا القول عن طبيعة الضَّوء: هل ينتقل الضَّوء مثل سيل من الجُسيمات بعيدًا عن مصدره، أم هل ينتقل بصورة موجات تنتشر نحو الخارج بعيدًا عن المصدر؟

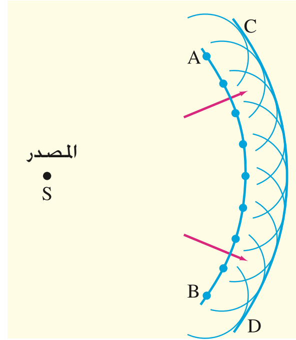
تاريخيًّا، يُعدّ هذا سؤالًا صعبًا. أوّلًا، لأنّ الضّوء لا يظهر نفسه بوضوح على أنّه مكوّنٌ من جُسيمات دقيقة؛ كما أنّنا لا نرى موجات ضوئية صغيرة تعبر أمامنا مثل موجات الماء. بدت الدلائل تفضل الجانب الأول في البداية، ولكن أصبح الميل إلى الجانب الثاني في حدود عام 1830، عندما تقبل معظم الفيزيائيين النّظريّة الموجيّة. ومع نهاية القرن التاسع عشر، اعتبر الضَّوء موجات كهرمغناطيسية (الفصل 22). وفي بداية القرن العشرين، أثبت أنّ للضَّوء طبيعة جسيمية كذلك، كما سنناقش في (الفصل 27). وعلى أيّ حال، فقد بقيت النّظريّة الموجيّة سارية المفعول، وأثبتت نجاحها. ونستقصي الآن دلائل النّظريّة الموجيّة، وكيفية استعمالها لتفسير مدى واسع من الظواهر.

1-24 الموجات مقابل الجسيمات مبدأ هويغنز والحيود

وضع العالم الهولندي كريستيان هويغنز (1629 – 1695)، المعاصر لنيوتن، مشروع النّظريّة الموجيّة للضَّوء. ولا يزال مفيدًا حتى اليوم ذلك الأسلوب الذي طوره هويغنز لاستنتاج المكان المستقبلي لمقدمة الموجة إذا كنا نعرف الموقع السابق. ونعني بمقدمة الموجة النقاطَ جميعها في بُعدين أو ثلاثة أبعاد التي تكون قمّة – وهو ما ندعوه "موجة" كما يظهر في المحيط. إنّ مقدمات الموجات تكون عمودية على الأشعة كما ناقشناها في (الفصل 11) (الشّكل 11 – 34).

مبدأ هويغنز

ويمكن أن نصيغ **مبدأ هويغنز** كما يلي: [كلّ نقطة على مقدمة الموجة يمكن اعتبارها مصدرًا للمويجات الصغيرة التي تنتشر نحو الأمام، وبسرعة مساوية لسرعة الموجة. وتكون مقدمة الموجة الجديدة هي الغلاف للمويجات جميعها؛ أي المماس لها كلها.]

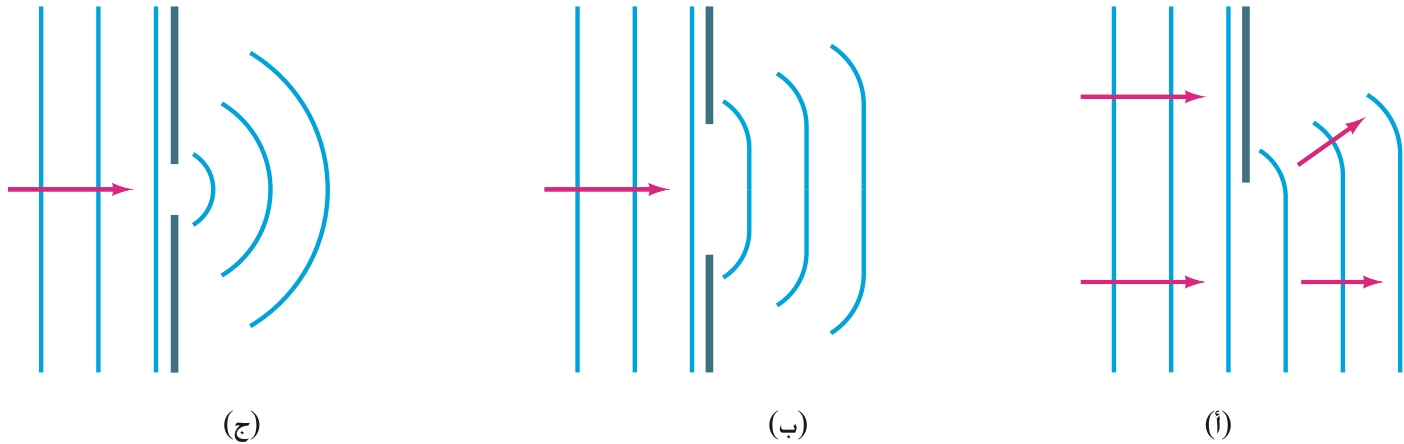


الشّكل 24 – 1. مبدأ هويغنز، يستعمل لإيجاد مقدمة الموجة CD إذا عرفنا مقدمة الموجة AB.

وكمثال بسيط لمبدأ هويغنز، نأخذ مقدمة الموجة AB كما في الشّكل (24-1)، والتي تنتقل بعيدًا عن المصدر S. ونفرض أنّ الوسط متماثل الجوانب؛ أي أنّ سرعة الموجة v. هي نفسها في الاتجاهات جميعها. ولنجد مقدمة الموجة بعد زمن t من المقدمة AB؛ نرسم دوائر صغيرة نصف قطر كلّ منها $r = vt$. إنّ مراكز هذه الدوائر هي النقاط الزرقاء على مقدمة الموجة الأصلية AB، وتمثل الدوائر مويجات هويغنز (الوهمية). إنّ المماس لكلّ هذه الدوائر هو المنحنى CD، وهو الموقع الجديد لمقدمة الموجة.

يُعدّ مبدأ هويغنز مهمًّا بصورة خاصة لتحليل ما يحدث عندما تسقط الموجات على حاجز، ويتمُّ اعتراض مقدّمات الموجات جزئيًّا. يتنبّأ مبدأ هويغنز بأنّ الموجات تنحني خلف الحاجز، كما هو مبين في الشّكل 24 – 2. وهذا ما تفعله موجات الماء تمامًا، كما رأينا في (الفصل 11) (الشّكلان 11 – 44، 11 – 45). ويُسمّى انحناءُ الموجات خلف الحواجز إلى "مناطق الظل" **الحيودَ**. ولأنّ الحيود يحصل للموجات وليس للجسيمات، فإنّ الحيود هو طريقة لتمييز طبيعة الضَّوء.

الشّكل 24 – 2. ينسجم مبدأ هويغنز مع الحيود (أ) حول حافة الحاجز. (ب) عبر فتحة كبيرة. (جـ) عبر فتحة صغيرة يقع عرضها في حدود الطّول الموجيّ.



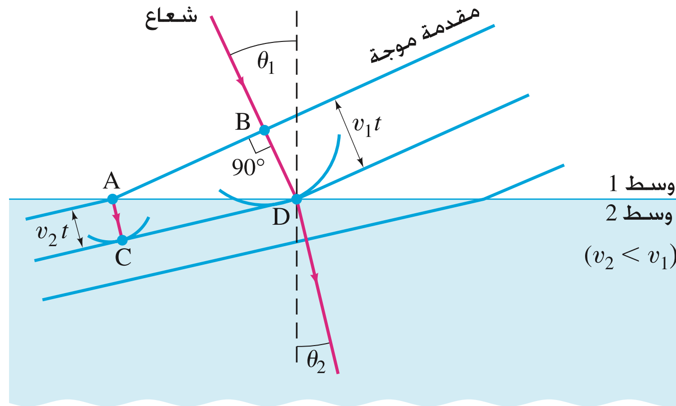
هل يبدي الضَّوء حيودًا؟ في منتصف القرن السابع عشر، لاحظ الراهب فرانسيسكو غريمالدي (1618 – 1663) أنه عندما يدخل ضوء الشّمس إلى غرفة معتمة عبر ثقب صغير في ستارة، فإنّ البقعة على الجدار المقابل تكون أكبر مما هو متوقع من الأشعة الهندسية. وقد لاحظ أيضًا أنّ حدود الصورة لم تكن واضحة، بل كانت محاطة بِهُدُبٍ ملونة. وقد عزى غريمالدي ذلك إلى حيود الضَّوء.

يتناول النّموذج الموجيّ للضَّوء عملية الحيود بصورة رائعة. لكن نموذج الأشعة (الفصل 23) لا يستطيع التعبير عن الحيود، ومن المهم أن نكون ملمين بهذه الحدود للنموذج الشّعاعي. إنّ الضَّوء الهندسي باستعمال الأشعة الضوئية ينجح في تفسير كثير من الظواهر فقط؛ لأنّ الحواجز والفتحات العادية تكون أكبر بكثير من الأطوال الموجيّة للضَّوء. لذلك يحدث القليل من الحيود والانحناء للضَّوء.

* 2-24 مبدأ هويغنز وقانون الانكسار

كان قانونا الانعكاس والانكسار معروفين جيّدًا في عصر نيوتن. ولكن، لم يستطع قانون الانعكاس التمييز بين النظريتين: الموجات مقابل الجسيمات. عندما تنعكس الموجات، فإنّ زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس (الشّكل 11 – 35). والحال صحيح كذلك بالنسبة للجسيمات؛ فكرّ في كرة التنس التي تصطدم بسطح منبسط دون حركة مغزلية.

أمّا قانون الانكسار فمسألة أخرى؛ تأمّل شعاعًا ضوئيًا يدخل وسطًا بحيث ينحني مقتربًا من العمود، كانتقاله من الهواء إلى الماء. وكما هو مبين في (الشّكل 24 - 3)، فإنّ هذا الانحناء يمكن بناؤه باستعمال مبدأ هويغنز إذا فرضنا أنّ سرعة الضَّوء ستكون أقلّ في الوسط الثاني $(v_2 < v_1)$. في زمن t، النّقطة B على مقدمة الموجة AB (عموديًا على الشّعاع الساقط) تنتقل مسافة $v_1 t$ للوصول إلى النّقطة D.



الشّكل 24 – 3، تفسير الانكسار باستعمال مبدأ هويغنز. مقدمات الموجات عمودية على الأشعة.

النّقطة A على مقدمة الموجة، تسير في الوسط الثاني، وتقطع مسافة $v_2 t$ لتصل إلى النّقطة C، حيث $v_2 t < v_1 t$. يطبق مبدأ هويغنز للنقطتين A، و B للحصول على المويجات المنحنية المبينة عند C، و D. مقدمة الموجة هي المماس لهاتين المويجتين. لذا، فمقدمة الموجة الجديدة هو الخط CD. وعليه، فإنّ الأشعة العمودية على المقدمات، تنحني نحو العمود إذا كانت $v_2 < v_1$، كما هو مرسوم. (وهذه هي المناقشة نفسها التي وردت فيما يخص الشّكل 11 – 43).

لقد فضل نيوتن النّظريّة الجسيمية للضَّوء، والتي أعطت نتائج معاكسة؛ أي أنّ سرعة الضَّوء في الوسط الثاني كانت أكبر $(v_2 > v_1)$. ولهذا، نستنتج من النّظريّة الموجيّة أنّ سرعة الضَّوء في الماء أقلّ من سرعته في الهواء. ولكن نظرية نيوتن الجسيمية تستنتج عكس ذلك. إنّ التجربة التي أجريت لقياس سرعة الضَّوء في الماء كانت في عام 1850 على يد العالم الفرنسي جين فوكولت، وأيدت نتائج النّظريّة الموجيّة. عندها كانت النّظريّة الموجيّة مقبولة تمامًا، كما سنرى في البند اللاحق.

يستند قانون سنيل في الانكسار إلى مبدأ هويغنز، باعتبار أنّ سرعة الضّوء v في أيّ وسط مرتبطة بسرعته في الفراغ، c، ومعامل الانكسار، n، (بالمعادلة 23-4)، أي: $v = c/n$.

من بناء هويغنز (للشكل 24-3)، الزاوية ADC تساوي θ_2، والزاوية BAD تساوي θ_1، وبالتالي في المثلثين اللذين لهما ضلع مشترك AD، عندنا

$$\sin\theta_1 = \frac{v_1 t}{\mathrm{AD}}, \qquad \sin\theta_2 = \frac{v_2 t}{\mathrm{AD}}$$

نقسم هاتين المعادلتين لنحصل على

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

ولكن $v_1 = c/n_1$ و $v_2 = c/n_2$، وأن

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

وهذا هو قانون سنيل في الانكسار، (المعادلة 23 – 5). (قانون الانعكاس يمكن اشتقاقه من مبدأ هويغنز بطريقة مماثلة).

يعتمد طول الموجة على n.

عندما تنتقل موجة ضوئية من وسط إلى آخر، فإنّ تردّدها لا يتغيّر، أمّا طولها فيتغيّر. ويمكن ملاحظة ذلك من (الشّكل 24 – 3)، حيث إنّ كلًّا من الخطوط الزرقاء يمثّل مقدّمة موجة تعود لقمة موجة. عندها

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2 t}{v_1 t} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2},$$

في الخطوة الأخيرة، استعملنا المعادلة (32 – 4)، $v = c/n$. إذا كان الوسط 1 هو الفراغ (أو الهواء)، لذلك $n_1 = 1,\ v_1 = c$، ونُسَمّي λ_1 ببساطة λ. وعندئذ، فإنّ طول الموجة في وسط آخر معامل انكساره $n\ (= n_2)$ ستكون

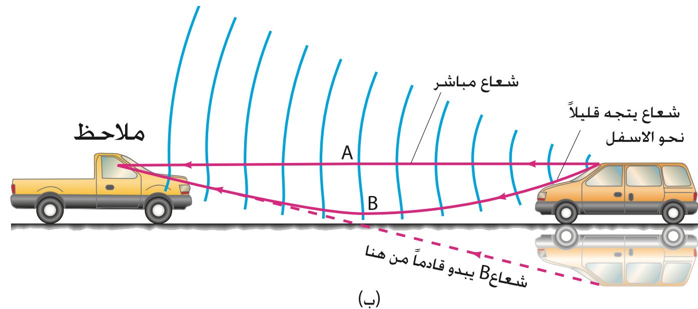
$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \qquad \textbf{(1-24)}$$

تنسجم هذه المعادلة مع عدم تغيّر التردّد f بغضّ النظر عن أيّ وسط يتحرك فيه الضّوء حيث $c = f\lambda$. يمكن استعمال مقدمات الموجات لتفسير كيفية تكوّن السّراب بواسطة انكسار الضّوء. فمثلا، يرى السّائقون في يوم حار سراب ماء على الطرق أمامهم، مع انعكاس المركبات البعيدة فيها (الشّكل 24 – 4أ) ، حيث تتكون هناك طبقة من الهواء الساخن مباشرة فوق سطح الأرض في مثل هذه الأيام الحارة. (التسخين بسبب أشعة الشّمس). يكون الهواء الساخن أقلّ كثافة من الهواء الأبرد، لذلك يكون معامل الانكسار أقل قليلا في الهواء الساخن. ونرى في (الشّكل 24 – 4 ب) مخططًا للضّوء القادم من نقطة على سيارة بعيدة (إلى اليمين) متجهة إلى اليسار نحو المُلاحِظ. وتتبين مقدمات الموجات وشعاعان. الشّعاع A يتجه مباشرة إلى الملاحظ ويتبع مسارًا مستقيمًا، ويمثل المنظر العادي لسيارة بعيدة. في حين يتجه الشّعاع B في البداية نحو الأسفل، ولكنه ينحني قليلا عندما يسير خلال طبقات من الهواء ذات معاملات انكسار مختلفة. إنّ مقدمات الموجات، المبينة باللون الأزرق في (الشّكل 24 – 4 ب)، تنتقل أسرع قليلًا في طبقات الهواء القريبة من الأرض (الشّكل 24 – 3) وكذلك التماثل في (الشّكل 11–43). وهكذا، فإنّ الشّعاع B ينحني كما هو مبين، ويبدو للناظر على أنه قادم من الأسفل (الخط المتقطع) كما لو كان منعكسًا عن الطريق؛ وهكذا يتكوّن السّراب.

تطبيق الفيزياء
السّراب في الطرق الخارجية

الشّكل 24 – 4 (أ) سراب على طريق سريع. (ب) الرسم (مبالغ فيه كثيرًا) يبين مقدمات الموجات والأشعة لتفسير السّراب. لاحظ كيف أنّ أجزاءً من مقدمات الموجات القريبة من الأرض تتحرك أسرع فتبدو متباعدة.

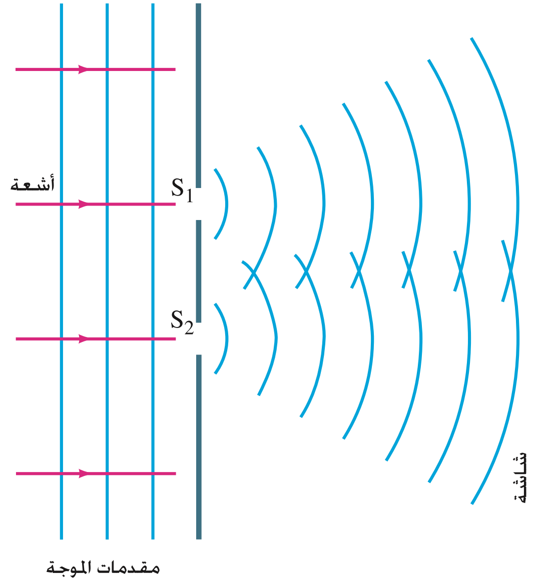

(أ)



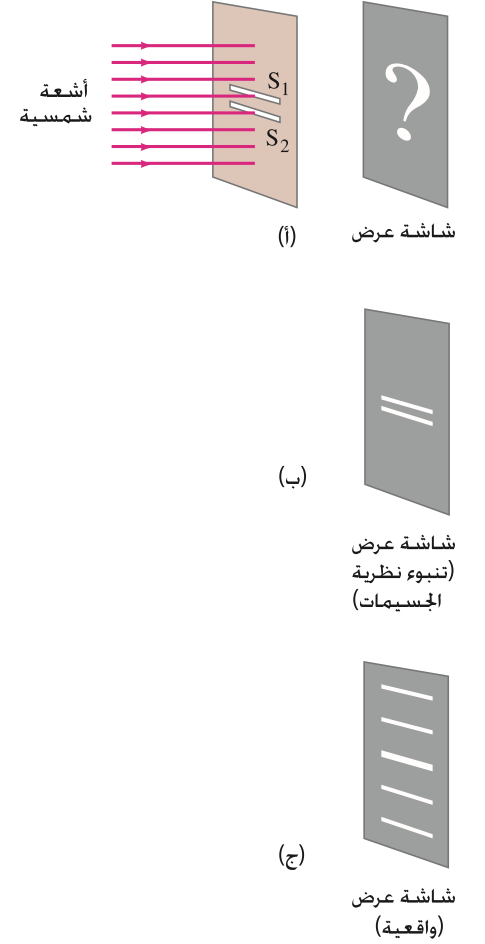
(ب)

3-24 التّداخل – تجربة شقيّ يونغ

توصّل العالِم الإنجليزي توماس يونغ (1773 – 1829) في عام 1801 إلى دليل مقنع لطبيعة الضّوء الموجيّة. واستطاع قياس الأطوال الموجيّة للضّوء المرئيّ. يبين (الشّكل 24 – 5أ) رسمًا تخطيطيًّا لتجربة يونغ المشهورة "الشّقّ – المزدوج". الضّوء القادم من مصدر واحد (استعمل يونغ الشّمس) يسقط على ستارة تحتوي شقين متجاورين هما S_1 و S_2. لو أنّ الضّوء مكوَّن من دقائق صغيرة. لتوقعنا مشاهدة خطين لامعين على شاشة موضوعة خلف الشّقّين كما في (ب). ولكن بدلا من ذلك. يلاحظ أنّ هناك سلسلة من الخطوط المضيئة. كما في (جـ). استطاع يونغ أن يفسر ذلك على أنّه نتيجة **تداخل الموجات**. ولرؤية ذلك؛ افترض موجات ضوء بطول موجي وحيد (مفرد) – تُسَمّى **وحيدة اللون** – تسقط على الشّقّين كما هو واضح في (الشّكل 24 – 6). وبسبب الحيود. فإنّ الموجات التي تغادر الشّقّين تنتشر كما هو مبين. إنّ هذا يكافئ نمط التّداخل النّاتج عند إلقاء حجرين في بحيرة (الشّكل 11 – 37). أو عندما يتداخل الصّوت الصادر من سماعتين (الشّكل 12 – 16). ارجع إلى (البند 11 – 12) الخاص بتداخل الموجات.

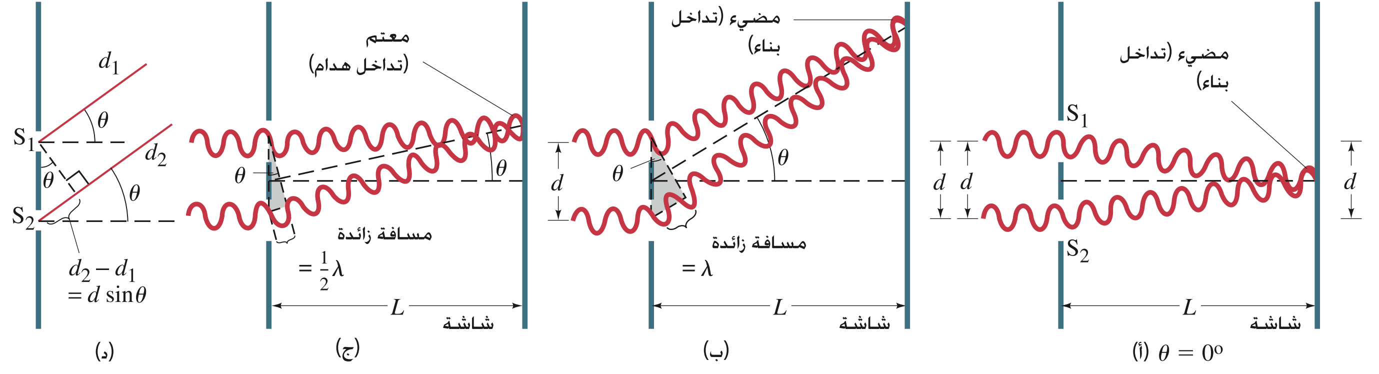


الشّكل 24 – 6. إذا كان الضّوء موجيًا، فإنّ الضّوء المار من أحد الشّقّين سوف يتداخل مع الضّوء المار من الشّقّ الآخر.



الشّكل 24 – 5 (أ) تجربة شقي يونغ. (ب) لو أنّ الضّوء مكوَّن من جسيمات، لرأينا خطين لامعين على الشاشة خلفهما. (جـ) في الواقع نشاهد عددًا كبيرًا من الخطوط.

وسنرى الآن كيف ينتج نمط التّداخل على شاشة. ونستفيد من (الشّكل 24 – 7). موجات طولها λ تُرى داخلة الشّقّين S_1 و S_2 حيث البعد بينهما d. تنتشر الموجات في الاتجاهات كلّها بعد العبور خلال الشّقّين. لكنّها موضّحة فقط لثلاث زوايا θ مختلفة. في (الشّكل 24 – 7أ). تبين الموجات التي تصل مركز الشاشة ($\theta = 0°$). الموجات القادمة من الشّقّين تقطع المسافة نفسها. لذا. تكون متفقة بالطور: قمة إحدى الموجتين تصل في وقت وصول قمة الموجة الأخرى. وبالتالي. تُضاف اتساعات الموجتين لتكوّن اتساعًا أكبر كما يبين (الشّكل 24 – 8أ). ويعدّ هذا تداخلا بنّاء. وهناك منطقة لامعة في منتصف الشاشة. يحدث التّداخل البناء كذلك عندما يختلف المساران بمقدار طول موجة واحدة (أو أيّ عدد صحيح من الأطوال الموجيّة). كما يبين (الشّكل 24 – 7 ب). وهنا كذلك سيكون لمعانًا على الشاشة. ولكن إذا سار أحد الشّعاعين مسافة أكبر بمقدار نصف طول موجة (أو $\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$ وهكذا). فإنّ الموجتين تكونان مختلفتين في الطور تمامًا عند وصولهما الشاشة: تصل القمة لإحدى الموجتين في الوقت نفسه لوصول "القاع" للموجة الثانية. لذا. تضاف الموجتان للحصول على إزاحة تساوي صفرًا (الشّكل 24 – 8 ب). ويُسَمّى هذا **تداخلًا هدّامًا**. وتكون الشاشة معتمة. (الشّكل 24 – 7 جـ). ومن ثمّ تتكوّن سلسلة من الخطوط اللامعة والمعتمة (أي **هدب**) على الشاشة.



الشّكل 24 – 7 كيف تفسر النّظريّة الموجيّة نمط الخطوط الملاحظة في تجربة الشّقّ – المزدوج. عند (أ) مركز الشاشة تقطع الموجات مسافات متساوية. لذلك، تكون متفقة في الطور. (ب) عند هذه الزاوية θ، تسير الموجة من الشّقّ السفلي مسافة إضافية بمقدار طول موجة كاملة، وتكون الموجات متفقة في الطور، لاحظ من المثلث المظلل أنّ فرق المسير يساوي $d \sin\theta$. (جـ) لهذه الزاوية θ، تسير الموجة من الشّقّ السفلي مسافة إضافية تساوي نصف طول موجة. لذا، تصل الموجتان الشاشة وهما مختلفتان في الطور. (د) مخطط تفصيلي يبين هندسة الفرعين (ب) و (جـ).

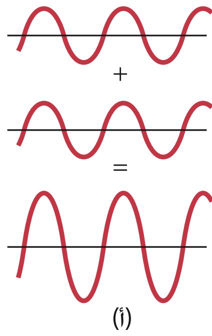
لتحديد مكان وقوع الخطوط اللامعة بالضبط، لاحظ أولًا أنّ (الشّكل 24 – 7) مبالغ فيه؛ في المواقف الحقيقية، البعد d بين الشّقّين صغير جدًّا بالنسبة للمسافة L بين الشّقّين والشاشة. لذلك، تكون الأشعة من الشّقّين لكلّ زاوية θ هي الزاوية التي يحصرانها مع الأفق كما هو مبين في (الشّكلين 24 – 7 ب، و24 – 7 جـ). نرى أنّ المسافة الإضافية التي يقطعها الشّعاع السفلي هي $d \sin\theta$ (أكثر وضوحا في الشّكل 24 – 7 د) يحدث التّداخل البنّاء، وتظهر هدبة لامعة على الشاشة، إذا كان فرق المسير، $d \sin\theta$، يساوي عددًا صحيحًا من الأطوال الموجيّة الكاملة:

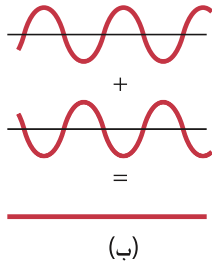
$$d \sin\theta = m\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots \qquad \text{[تداخل بنّاء (لامع)]} \qquad \textbf{(24 – 2 أ)}$$

تسمى قيمة m **"الرتبة"** لأهداب التّداخل. **الرتبة الأولى** ($m = 1$) مثلا، هي الهدبة الأولى على الجانبين من الهدبة المركزية (والتي تكون عند $\theta = 0, m = 0$). يحدث التّداخل الهدّام عندما يكون فرق المسير الضوئي $d \sin\theta$ مساويًا لـ $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$ وهكذا:

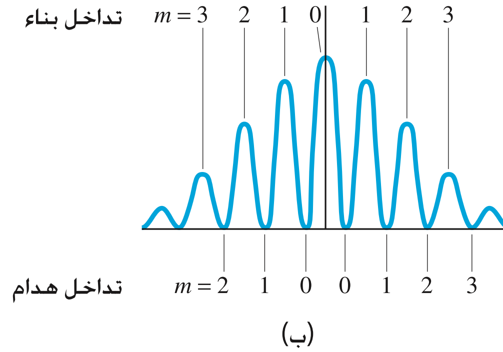
$$d \sin\theta = (m + \tfrac{1}{2})\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots \qquad \text{[تداخل هدام (معتم)]} \qquad \textbf{(24 – 2ب)}$$

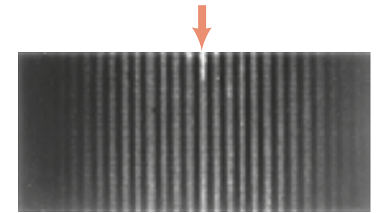
إنّ الهدب اللامعة تكون قمة، أو شدة ضوئية عظمى، في حين تكون الهدب المعتمة شدة ضوئية دنيا. شدة الضَّوء العظمى في الهدبة اللامعة المركزية ($m = 0$) وتبدأ بالنقصان للرتب الأكبر، كما هو واضح في (الشّكل 24 – 9). ويعتمد مقدار تناقص الشدة مع زيادة الرتبة على عرض الشّقّين.





الشّكل 24 – 8. موجتان تشكّلان (أ) تداخلا بناءً (ب) تداخلا هدّاما. (انظر كذلك البند 11 – 12)





الشّكل 24 – 9 (أ) هدب التّداخل الناتجة في تجربة الشّقّ – المزدوج، وتم الكشف عنها بفيلم تصوير وضع على الشاشة. يشير السهم إلى الهدبة المركزية. (ب) رسم لشدة الضَّوء في نمط التّداخل. وتبدو أيضًا قيم m (للمعادلة 24 – 2 أ) (التّداخل البناء) (وللمعادلة 24 – 2ب) (التّداخل الهدّام).

المثال 24-1 البعد بين خطوط التّداخل في الشّقّ المزدوج

تبعد ستارة $1.20\ \mathrm{m}$ عن شقين تفصلهما مسافة $0.100\ \mathrm{mm}$. يسقط ضوء طول موجته $\lambda = 500\ \mathrm{nm}$ على الشّقّين من مصدر بعيد. على نحو تقريبيّ، كم سيكون البعد بين كلّ هدبتين لامعتين متجاورتين على الستارة؟

النّهج: الموقع الزاوي للهدب اللامعة (التّداخل البناء) يمكن معرفته باستعمال (المعادلة $24 - 2$أ). البعد بين أول هدبتين (مثلا) يحسب باستعمال المثلثين القائمين كما في (الشّكل $24 - 10$).

الحلّ: بمعرفة أنّ $\lambda = 500 \times 10^{-9}\ \mathrm{m}$, $d = 0.100\ \mathrm{mm} = 1.00 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}$, و $L = 1.20\ \mathrm{m}$.

فالهدبة ذات الرتبة $(m = 1)$ تقع عن الزاوية θ حيث

$$\sin\theta_1 = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(500 \times 10^{-9}\ \mathrm{m})}{1.00 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}} = 5.00 \times 10^{-3}$$

وهذه زاوية صغيرة جدًّا ويمكننا اعتبار $\sin\theta \approx \theta$، حيث θ بالزاوية النصف قطرية. الهدبة ذات الرتبة الأولى ستقع على بعد x_1 فوق مركز الستارة (انظر الشّكل $24 - 10$) وتعطى بـ $x_1/L = \tan\theta_1 \approx \theta_1$. وهكذا

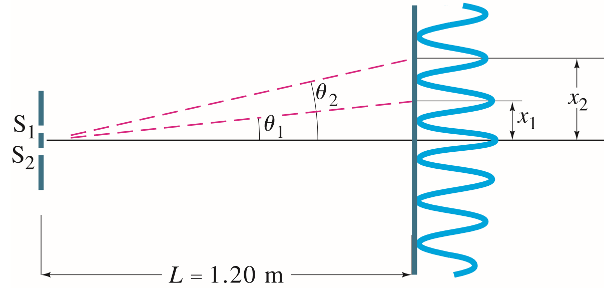
$$x_1 \approx L\theta_1 = (1.20\ \mathrm{m})(5.00 \times 10^{-3}) = 6.00\ \mathrm{mm}$$

أمّا الهدبة الثانية $(m = 2)$ فستكون عند

$$x_2 \approx L\theta_2 = L\frac{2\lambda}{d} = 12.0\ \mathrm{mm}$$

فوق المركز. وهكذا، فالبعد بين كلّ هدبتين متجاورتين هو $6.00\ \mathrm{mm}$.

تنويه: استعمل التقريب $\theta \approx \sin\theta$ أو $\theta \approx \tan\theta$ فقط إذا كانت θ زاوية صغيرة وبالتقدير الدائري.



الشّكل 24 – 10 (المثالان 24 – 1، و 24 –2) للزوايا الصغيرة، تتكون هدب التّداخل عند $x = \theta L$ بعد فوق الهدبة المركزية $(m = 0)$; θ_1 و x_1 هي للهدبة ذات الرتبة الأولى $(m = 1)$, θ_2 هي للرتبة $m = 2$.

المثال المفاهيمي 24-2 تغيير الطّول الموجيّ

(أ) ماذا يحدث لنمط التّداخل المبين في (الشّكل $24 - 10$). (المثال $24 - 1$). عند استبدال الضّوء الساقط $\lambda = 500\ \mathrm{nm}$ بضوء طول موجته $700\ \mathrm{nm}$؟ (ب) ماذا يحدث لو بقي طول الموجة $500\ \mathrm{mn}$ ولكن بُعد الشّقّين أكثر؟

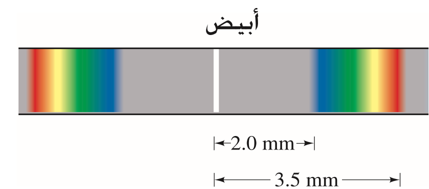
الجواب: (أ) عندما تزداد λ في (المعادلة $24 - 2$ أ) في حين تبقى المسافة d ثابتة، فإنّ الزاوية θ للهدب اللامعة تزداد وينتشر نمط التّداخل (يتمدّد). (ب) زيادة البعد بين الشّقّين d تقلل θ لكلّ هدبة، وهكذا تقترب الهدب أكثر.

من (المعادلة $24 - 2$) يمكننا إدراك أنّه، فيما عدا الهدبة ذات الرتبة صفر عند المركز، فإنّ موقع الهدب يعتمد على طول الموجة. وهكذا، عند سقوط ضوء أبيض على الشّقّين، وكما وجد يونغ في تجاربه، فإنّ الهدبة المركزية تكون بيضاء، ولكن الهدبة الأولى (والأعلى رتبة) تحتوي على طيف من الألوان كما في قوس المطر؛ حيث وجد أنّ θ تكون الأقل للضّوء البنفسجيّ، والأكبر للضّوء الأحمر (الشّكل $24 - 11$). وبقياس مواقع هذه الهدب، كان يونغ أول من قاس الأطوال الموجيّة للضّوء المرئيّ (باستعمال المعادلة $24 - 2$). وبعمله هذا، تبيّن يونغ أنّ ما يميّز الألوان المختلفة هو أطوالها الموجيّة (أو ترددها)، وهي الفكرة التي ذكرها غريمالدي عام 1665.

الطّول الموجيّ (أو التردد) يحدد اللون.

المثال 24-3 حساب الأطوال الموجيّة من تداخل الشّقّ ـ المزدوج

يمرُّ ضوء أبيض عبر شقين البعد بينهما $0.50\ \mathrm{mm}$، ويلاحظ نمط التّداخل على ستارة بعدها $2.5\ \mathrm{m}$. تحاكي الهدبة الأولى قوس المطر حيث الضّوء البنفسجيّ والأحمر عند النهايتين. الضّوء البنفسجيّ عند $2.0\ \mathrm{mm}$ والأحمر عند $3.5\ \mathrm{mm}$ من المركز (الشّكل $24 - 11$). خمّن الأطوال الموجيّة لكلّ من الضّوءين البنفسجيّ والأحمر.



الشّكل 24 – 11. الهدب ذات الرتبة الأولى هي طيف كامل. كذلك (المثال 24 – 3).

النّهج: نجد الزاويتين لكلٍّ من الضّوء البنفسجيّ والأحمر من المسافات المعطاة و (الشّكل 24-10). ثمّ نستعمل (المعادلة 24 – 2أ) للحصول على الأطوال الموجيّة. لأنّ 3.5 mm أصغر بكثير من 2.5 m يمكننا استعمال تقريب الزوايا الصغيرة.

الحلّ: نستعمل (المعادلة 24 – 2أ) حيث $m = 1$. وبذلك، $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$. ثمّ للضّوء البنفسجيّ $x = 2.0\ \text{mm}$. كذلك (انظر الشّكل 24 – 10)

$$\lambda = \frac{d\sin\theta}{m} \approx \frac{d\theta}{m} \approx \frac{d}{m}\frac{x}{L} = \left(\frac{5.0\times10^{-4}\,\text{m}}{1}\right)\left(\frac{2.0\times10^{-3}\,\text{m}}{2.5\,\text{m}}\right) = 4.0\times10^{-7}\,\text{m}$$

أو 400 nm. وللضّوء الأحمر $x = 3.5\ \text{mm}$، أي

$$\lambda = \frac{d}{m}\frac{x}{L} = \left(\frac{5.0\times10^{-4}\,\text{m}}{1}\right)\left(\frac{3.5\times10^{-3}\,\text{m}}{2.5\,\text{m}}\right) = 7.0\times10^{-7}\,\text{m} = 700\,\text{nm}$$

التمرين A: للترتيب العملي في (المثال 24 – 3). على أيّ بعد من الهدبة المركزية البيضاء تقع الهدبة ذات الرتبة الأولى للضّوء الأخضر ذي الطّول الموجيّ $\lambda = 500\ \text{nm}$؟

الضّوء المترابط.

المصادر المترابطة وغير المترابطة.

يحدث التّداخل فقط إذا كانت المصادر مترابطة (منسجمة ذاتيًا).

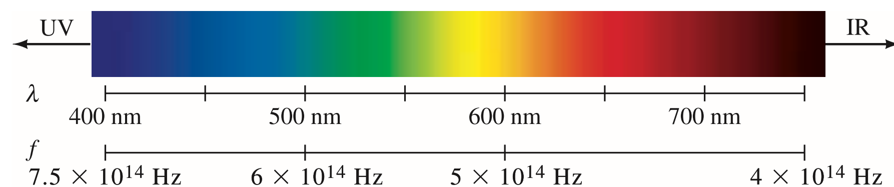
الشّقّان في (الشّكل 24 – 7) يعملان كما لو كانا مصدرين للإشعاع. ويسمّيان **مصدرين مترابطين**؛ لأنّ الموجتان الصادرتان عنهما لهما الطّول الموجيّ والتردّد نفساهما. ولهما كذلك الطور ذاته في الأوقات جميعها. ويحدث ذلك لأنّ الموجات تأتي من مصدر واحد إلى يسار الشّقّين في (الشّكل 24 – 7). يمكن ملاحظة نمط الحيود فقط إذا كان المصدران مترابطين. ولو تمّ وضع مصدرين (مصباحين) صغيرين في مكان الشّقّين فلن نرى نمط التّداخل؛ لأنّ الضّوء النّاتج من أحد المصباحين سيكون له طور عشوائيّ مع ضوء المصباح الثاني. وسوف تكون إضاءة الستارة إلى حدٍّ ما منتظمة. ويُسَمّى المصدران من هذا النوع حيث لا يوجد بين ضوءيهما علاقة طور ثابتة **مصدرين غير مترابطين**.

4-24 الطّيف المرئيّ والتّفريق اللوني

وهكذا، فإنّ أوضح خاصيتين من خصائص الضّوء يمكن وصفهما بدلالة النّظريّة الموجيّة للضّوء: أي شدة الضّوء أو لمعانه ولونه. إنّ **شدة الضّوء** هي الطّاقة التي تحملها الموجة لكلّ وحدة مساحة في وحدة الزمن، وترتبط بمربع اتساع الموجة، مثل أيّ نوع من الموجات (انظر البند 11 – 10. أو المعادلتين 22 – 7 و 22 – 8). ويرتبط **لون** الضّوء بتردده f أو بطول موجته λ. (نذكر أنّ $\lambda f = c = 3.0\times10^{8}\ \text{m/s}$ المعادلة 22 – 4). يتكون الضّوء المرئيّ –الذي تشاهده عيوننا– من ترددات تبدأ بـ $4\times10^{14}\ \text{Hz}$ إلى $7.5\times10^{14}\ \text{Hz}$ وتقابل أطوالًا موجيّة في الهواء من 400 nm إلى 750 nm.* وهذا ما يعرف **بالطّيف المرئيّ** الذي تقع ضمنه الألوان المختلفة من البنفسجيّ حتى الأحمر، كما يبين (الشّكل 24 – 12). يُسَمّى الضّوءُ ذو الطّول الموجيّ الأقلّ من 400 nm **الضّوءَ فوق البنفسجيّ** (UV) أما الضّوء ذو الطّول الموجيّ الأكبر من 750 nm فيدعى **الأشعة تحت الحمراء** (IR).** وعلى الرغم من أنّ عين الإنسان ليست حسّاسة للأشعتين UV، و IR، الاّ أنّ بعض أجهزة الكشف والأفلام الحسّاسة، تستجيب لهما.

* يستعمل أحيانًا الإنجستروم (Å) عند الحديث عن الضّوء: $1\ \text{Å} = 1\times10^{-10}\ \text{m}$. الضّوء المرئيّ في الهواء له أطوال موجية تتراوح بين 4000 Å، و 7500 Å.

** الطّيف الكهرومغناطيسيّ المرئيّ مبيّن في (الشّكل 22 – 8).



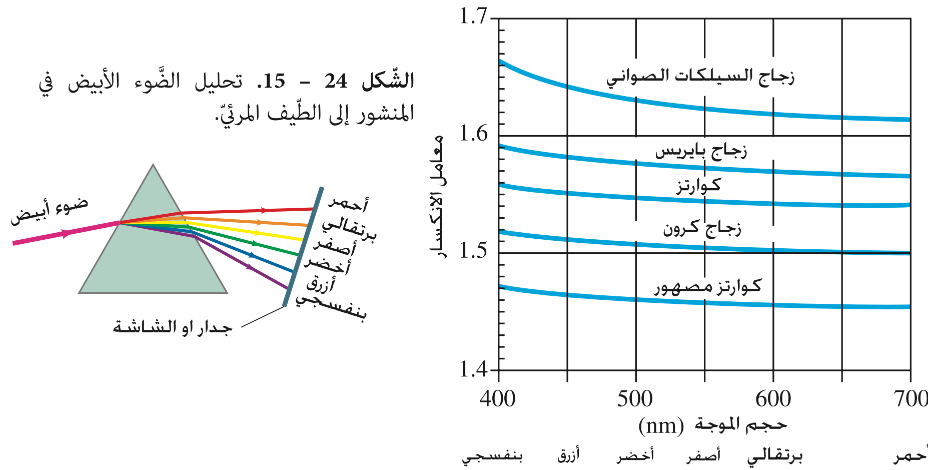
الشّكل 24 – 12. طيف الضّوء المرئيّ، مبينًا مدى التردد والطّول الموجيّ (في الهواء) للألوان المختلفة.

[تمّ قياس الأطوال الموجيّة للضّوء المرئيّ في الهواء ووجدت أنّها تتراوح بين 400 nm إلى 750 nm. وهذا المدى هو ما نشير إليه عادة. لكن، وكما سنرى في (الفصل 25). فإنّ داخل العين مملوء بسائل معامل انكساره $n \approx 1.4$ ولذلك، فإنّ الأطوال الموجيّة التي تصل إلى الشبكية في عيوننا ستكون أقلّ بهذا المعامل، المعادلة 24 – 1.]

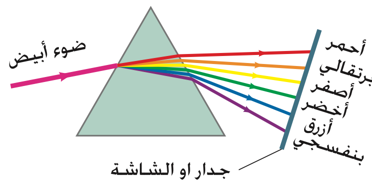


الشّكل 24 - 13. يتحلل الضّوء الأبيض الساقط إلى ألوانه المختلفة.

يفصل المنشور الضّوء الأبيض إلى قوس المطر من الألوان، كما في (الشّكل 24 – 13). ويحدث ذلك لأنّ معامل الانكسار للمادة يعتمد على الطّول الموجيّ، كما هو واضح لكثير من المواد في (الشّكل 24 – 14). إنّ الضّوء الأبيض مزيج من الأطوال الموجيّة المرئيّة كلّها، وعند سقوطه على المنشور، كما في (الشّكل 24 – 15)، فإنّ الأطوال الموجيّة المختلفة تنكسر بزوايا مختلفة. ولأنّ معامل الانكسار أكبر للأطوال الموجيّة الأصغر، فإنّ الضّوء البنفسجيّ هو الأكثر انكسارًا والأحمر هو أقلّها. إنّ انتشار (تحليل) الضّوء الأبيض هذا إلى الألوان المختلفة (الطّيف الكلّي) يدعى التّفريقَ اللونيَّ.



الشّكل 24 – 14 معامل الانكسار كدالة بالطّول الموجيّ لمواد صلبة شفافة متعددة.

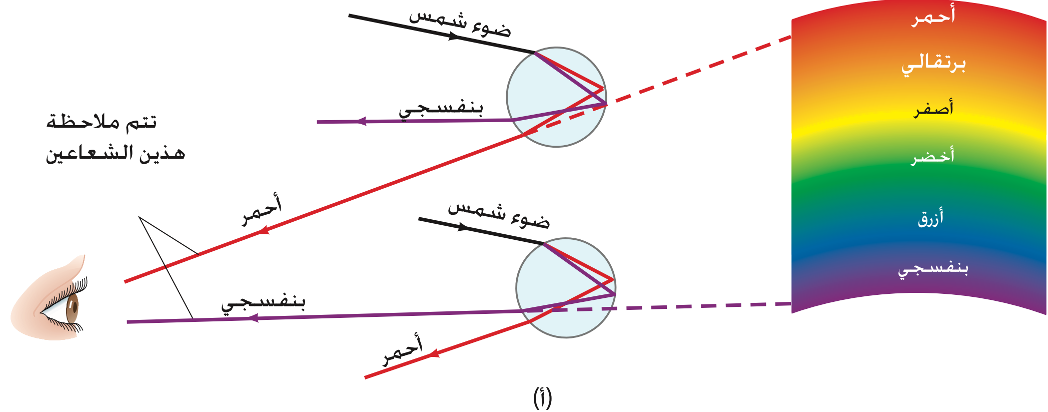


الشّكل 24 - 15. تحليل الضّوء الأبيض في المنشور إلى الطّيف المرئيّ.

تطبيق الفيزياء
قوس المطر

ويُعَدُّ قوسُ المطر مثالًا حيًّا على التّفريق اللوني – بواسطة قطرات المطر. يمكنك مشاهدة قوس المطر عند النظر إلى رذاذ الماء الساقط ومن خلفه الشّمس. ويبين (الشّكل 24 – 16) كيفيّة انثناء الأشعة الحمراء والبنفسجيّة بواسطة قطرات الماء الكروية، وكيفيّة انعكاسها على السطح الخلفي للقطرة. ينثني الضّوء الأحمر قليلا. ولذلك، يصل العين من القطرات العلوية في السماء، كما هو مبيّن في الشّكل. لذا، يكون أعلى القوس أحمر اللون.

الشّكل 24 – 16 (أ) رسم تخطيطي يبين كيفية تكوّن قوس المطر (ب)



(أ)



(ب)

الشّكل 24 – 17. الألماس.



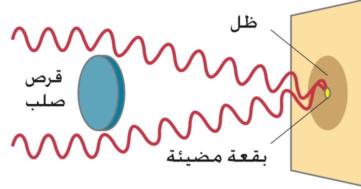
يحقّق الألماس لمعانه (الشّكل 24 – 17) من خلال الجمع بين التّفريق اللوني والانعكاس الداخلي الكلّيّ. ولأنّ للألماس معامل انكسار كبيرًا، 2.4 تقريبًا، فإنّ الزاوية الحرجة للانعكاس الداخليّ الكلّيّ هي $25°$ تقريبًا. فالضّوء المتفرق إلى طيف من الألوان داخل الألماس يقع على العديد من السطوح الداخلية قبل أن يصطدم بأحدها بزاوية أقل من $25°$ ويخرج. وبعد انعكاسات كثيرة، فإنّ الضّوء يكون قد قطع مسافة كبيرة بحيث تنفصل الألوان بصورة كبيرة لتُرى لامعة بالعين بعد مغادرتها البلّورة.

إنّ الطّيف المرئيّ (الشّكل 24 – 12). لا يُظهر الألوان التي نراها في الطّبيعة جميعها. فمثلًا، ليس هناك لونٌ بنيٌّ في (الشّكل 24 – 12). كثيرٌ من الألوان التي نراها هي مزيج من الأطوال الموجيّة. وللأغراض العملية، فإنّ معظم الألوان الطبيعية يمكن الحصول عليها باستعمال ثلاثة ألوان أساسيّة هي الأحمر، والأخضر، والأزرق، كما هو الحال في التلفزيون TV، وأجهزة الحاسوب. أمّا في حبر الطباعة، فالألوان الأساسية هي الأزرق الغامق، والأصفر، والأحمر الأرجواني (اللون المستعمل هنا لبيان الأشعة الضوئية).

5-24 حيود الشّقّ المنفرد أو القرص

لقد وضعت تجربة يونغ للشق المزدوج النّظريّة الموجيّة على أساسٍ قويٍّ. ولكن القبول الكامل لها أتى فقط مع دراسة الحيود (البند 24 – 1). وقد رأينا أنها ترتبط بانتشار الموجات أو انحنائها حول الحواف. دعنا ننظر لذلك بتفاصيل أكثر.

في عام 1819 قدم أغستين فرينل للأكاديمية الفرنسية نظرية موجية للضّوء استنتجت وفسّرت الآثار المختلفة في التّداخل والحيود. وفي غضون ذلك قدم سيمون بوصون (1781 – 1840) استدلالا مضادًا؛ فوفقا لنظرية فرينل الموجيّة، إذا سقط ضوء من مصدر نقطي على حواف قرص صلب، فإنّ جزءًا من الضّوء الساقط سيحيد عند الحافة، وسوف يتداخل تداخلا بناءً عند مركز الظل (الشّكل 24 – 18). وقد بدا هذا التنبؤ غير محتمل. ولكن عندما أجريت التجربة بالفعل على يد فرانكو اراغو، أمكن رؤية البقعة المضيئة عند مركز الظل تمامًا. (الشّكل 24 – 19أ). وقد كان هذا دليلا قويّا للنظرية الموجيّة.

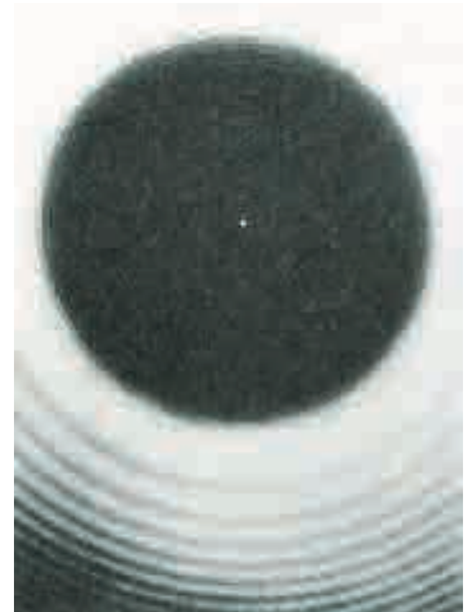


الشّكل 24 – 18 لو كان الضّوء موجة، فستظهر بقعة لامعة عند مركز الظل لقرص مضاء بواسطة مصدر نقطي وحيد اللون.

بقعة الحيود (غير) المتوقعة.

(الشّكل 24 – 19أ) صورة للظلّ النّاتج من قطعة نقود باستعمال (تقريبًا) مصدر نقطي للضّوء، ليزر في هذه الحالة. البقعة المضيئة موجودة بوضوح في المركز. لاحظ أيضًا الهدب المضيئة والمعتمة خارج الظل، إنّها تشبه هدب التّداخل لشق مزدوج. وبالفعل، إنها تعود لتداخل موجات الحيود حول القرص، ويدعى ذلك بنمط الحيود. يتكون نمط الحيود حول أي جسم حاد مضاء من مصدر نقطي. كما هو مبين في (الشّكلين 24 – 19 ب و جـ). لكننا لا ندرك ذلك دائمًا؛ لأنّ معظم مصادر الضّوء في الحياة اليومية ليست نقطية. لذلك، فإنّ الضّوء من الأجزاء المختلفة للمصدر تمحو نمط الحيود.

الشّكل 24 – 19 نمط حيود (أ) قرص دائري (قطعة نقود) (ب) مقص (جـ) شق منفرد يُضاء بمصدر نقطي (تقريبًا) لضوء وحيد اللون.

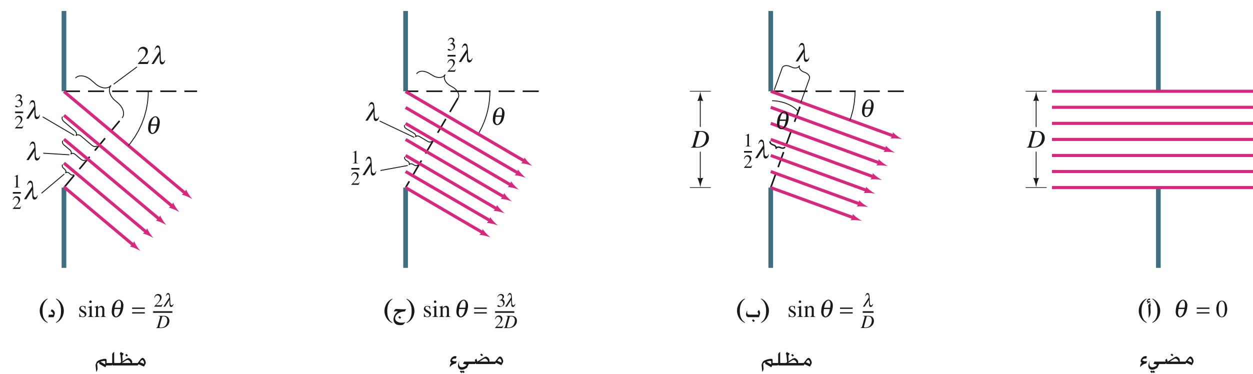

(أ)


(ب)


(ج)

لرؤية كيف ينشأ نمط الحيود؛ سنحلّل الحالة المهمّة لضوء وحيد اللون يمرّ خلال فتحة ضيقة. سوف نفرض أشعة متوازية (موجات مستوية) لضوء يسقط على شق عرضه D، ويمرّ إلى شاشة بعيدة جدًّا*. وكما نعرف من دراسة موجات الماء ومن مبدأ هويغنز، فإنّ الموجات التي تعبر الشّقّ تمتد لتنتشر في الاتجاهات جميعها. وسنختبر الآن كيف أنّ الموجات التي تعبر أجزاءً مختلفة من الفتحة تتداخل معًا.

إنّ الأشعة المتوازية لضوء وحيد اللون تمرّ خلال شق ضيق كما هو مبين في (الشّكل 24 – 20أ). يسقط الضّوء على شاشة بعيدة، لذلك فالأشعة المتجهة نحو أيّ نقطة على الشاشة ستكون متوازية تقريبًا قبل أن تلتقي. نعتبر أولا الأشعة التي تمر مباشرة كما في (الشّكل 24 – 20أ) أنها كلها في الطور نفسه. لذا، ستكون بقعة مضيئة عند منتصف الشاشة. في (الشّكل 24 – 20ب). نعتبر أشعة تنتقل بزاوية، بحيث يسير الشّعاع عند قمة الفتحة مسافة طول موجة أبعد من الشّعاع القادم من أسفل الفتحة للوصول إلى الشاشة. أمّا الشّعاع القادم من منتصف الفتحة فيسير بمقدار نصف طول موجة أبعد من الشّعاع القادم من أسفل هذه الفتحة. هذان الشّعاعان سوف يكونان مختلفين في الطور بصورة تامة عندما يتداخلان تداخلا هدّامًا عند الشاشة. وبصورة مماثلة، فإنّ شعاعًا فوق أسفل الفتحة قليلا سوف يلغي شعاعًا على البعد نفسه فوق الشّعاع عند المنتصف. وفي الواقع، فإنّ كلّ شعاع يمرّ خلال النصف السفلي للفتحة سوف يلغي الشّعاع المناظر الذي يمر خلال النصف العلويّ.



الشّكل 24 – 20 تحليل نمط الحيود المتكوّن للضّوء المار خلال شق ضيق.

وهكذا، فالأشعة كلّها تتداخل تداخلاً هدّامًا بصورة زوجية. ولذلك، تكون شدة الضّوء صفرًا على الشاشة عند هذه الزاوية.

الزاوية θ التي يحصل عندها ذلك يمكن رؤيتها من (الشّكل 24 – 20 ب)، وتكون عند $\lambda = D\sin\theta$ أي أنّ

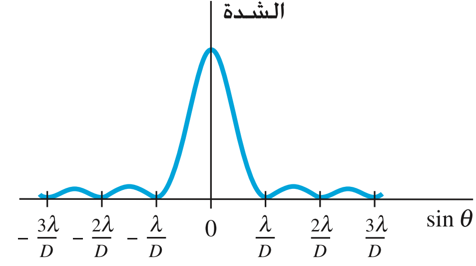
معادلة الحيود (نصف العرض الزاوي للنقطة المركزية)

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D}$$ [أول شدة دنيا] **(24 – 3أ)**

تكون شدة الضّوء عظمى عند $\theta = 0°$، وتقلّ إلى قيمة دنيا (شدة = صفرا) عند الزاوية التي تعطى بالعلاقة (24 – 3أ).

والآن، نأخذ زاوية θ أكبر بحيث ينتقل الشّعاع العلوي مسافة $\frac{3}{2}\lambda$، أكبر من مسافة الشّعاع السفلي، الشّكل (24 – 20 جـ) في هذه الحالة، الأشعة من الثلث السفلي سوف تلغى بصورة زوجية مع الأشعة من الثلث الأوسط؛ لأنّها ستكون مختلفة في الطور بمقدار $\lambda/2$. وعلى أيّ حال، فإنّ الضّوء من الثلث العلوي سوف يصل الشاشة. لذلك، ستكون هناك بقعة مضيئة عند $\theta \approx 3\lambda/2D$، ولكنها لا تكون بالإضاءة نفسها للبقعة عند $\theta = 0°$، ولزاوية θ أكبر بحيث يسير الشّعاع العلوي بمقدار $\lambda/2$ أكبر من الشّعاع السفلي. (الشّكل 4 – 20 د)، فإنّ الأشعة من الربع السفلي للفتحة سوف تلغي الأشعة من الربع المجاور؛ لأنّ فرق المسار الضّوئيّ سيختلف بـ $\lambda/2$. أمّا الأشعة من الربع الأعلى المجاور فسوف تلغي الأشعة من الربع الأول في الأعلى. وعند هذه الزاوية، ستكون الإضاءة أقلّ ما يمكن على الشاشة.

* إن لم تكن الشاشة بعيدة، فيمكن استعمال عدسات لتجعل الأشعة متوازية.



الشّكل 24 – 21. شدة الضّوء في نمط الحيود لشق منفرد كدالة مع $\sin\theta$ لاحظ أنّ الهدبة المركزية ليست أعلى بكثير من حيث شدة الضّوء، بل إنّ عرضها أيضًا ضعف $(2\lambda/D)$ عرض أيّ هدبة أخرى (فقط λ/D).

يوضح (الشّكل 24-21) رسم شدة الضّوء كدالّة مع الزاوية. وهذا يتفق تمامًا مع الصورة في (الشّكل 24 – 19 جـ). لاحظ أنّ قيمًا دنيا (شدة الضوء تساوي صفرًا) تحدث عند

$$D\sin\theta = m\lambda, \qquad m = 1, 2, 3, \cdots, \qquad \text{[قيم دنيا]} \qquad \textbf{(24 – 3ب)}$$

قيم دنيا لحيود الشق الواحد.

وهناك بين القيم الدنيا قيمٌ عظمى تحدث عند... $m \approx \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \ldots$ تقريبًا لاحظ أنّ القيم الدنيا لنمط حيود. (المعادلة 24 – 3 ب) تحقق شروطًا مشابهة لتلك التي للقيم العظمى (البقع المضيئة) للتداخل في الشّقّ المزدوج. (المعادلة 24 – 2أ). لاحظ أيضًا أنّ D هو عرض شق منفرد. أمّا d في (المعادلة 24 – 2) فهي المسافة بين الشّقّين.

تنويه:
ميّز بين (المعادلة 24 – 2) للتداخل و (المعادلة 24 – 3) للحيود، لاحظ الفروق.

المثال 24-4 القيم العظمى لحيود الشّقّ – المنفرد

يمرّ ضوء طول موجته 750 nm عبر شق عرضه 1.0×10^{-3} mm. ما عرض الهدبة المركزية العظمى على شاشة تبعد 20 cm (أ) بالدرجات؟ (ب) بالسنتيمترات؟

النّهج: يبدأ عرض الهدبة من القيمة الدنيا في جانب إلى القيمة الدنيا في الجانب المقابل. نستعمل (المعادلة 24 – 3أ) لإيجاد الموقع الزاوي للقيمة الدنيا في حيود الشّقّ المنفرد.

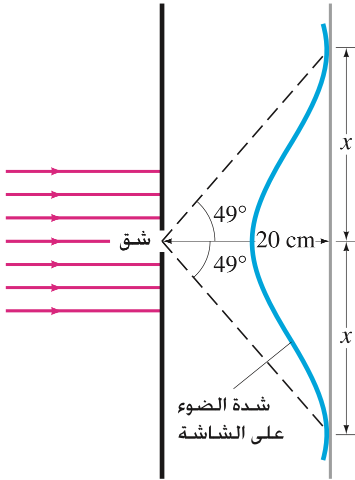
الحلّ: (أ) تقع القيمة الدنيا الأولى عند

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{7.5 \times 10^{-7}\,\text{m}}{1 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.75$$

وهكذا، فإنّ $\theta = 49°$ وهذه هي الزاوية بين المركز والقيمة الدنيا الأولى. (الشّكل 24 – 22). إذن، الزاوية التي تقابل الهدبة المركزية كاملة الواقعة بين القيمة الدنيا أعلى المركز وتلك أسفله ، ضعف هذه القيمة، أي 98°.

(ب) عرض الهدبة المركزية العظمى هو $2x$، حيث $\tan\theta = x/20\,\text{cm}$
لذلك $2x = 2(20\,\text{cm})(\tan 49°) = 46\,\text{cm}$

ملحوظة: عرضٌ كبيرٌ من الشاشة سيكون مضاء. ولكنّه لا يكون لامعًا عادة؛ لأنّ الضّوء الذي يمرّ من فتحة ضيقة كهذه سيكون قليلا. ويتوزع على مساحة كبيرة. لاحظ أيضًا أنّنا لا نستطيع استعمال تقريب الزاوية هنا $(\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta)$؛ لأنّ θ كبيرة.



الشّكل 24 – 22. (المثال 24-4)

التمرين B: في (المثال 24 – 4). استعمل الضّوء الأحمر $(\lambda = 750\,\text{nm})$. ولكن لو استعملنا الضّوء الأصفر $(\lambda = 550\,\text{nm})$ فهل ستكون الهدبة المركزية أكثر عرضا أم أقلّ؟

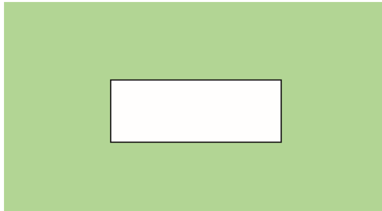
المثال المفاهيمي 24-5 امتداد الحيود

يسطع الضّوء عبر فتحة مستطيلة بصورة أضيق بالاتجاه العمودي عمّا هو عليه في الاتجاه الأفقي. (الشّكل 24 – 23). (أ) أي الاتجاهين تتوقع أن يمتد نمط الحيود به: العمودي أم الأفقي؟ (ب) هل يفضل أن تكون سماعة في ملعب ما مستطيلة وعالية وضيقة، أم عريضة ومنبسطة ؟

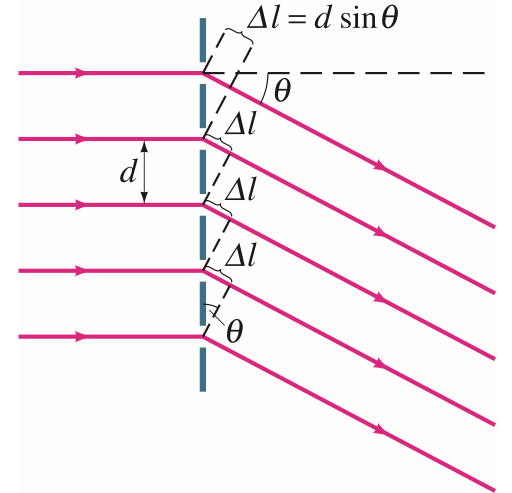
الجواب: (أ) من (المعادلة 24 – 3أ). يمكننا أن نرى أنّه إذا جعلنا الشّقّ (عرض D) أضيق. فإنّ النمط يمتد أكثر. وهذا ينسجم مع دراستنا للموجات في (الفصل 11). الحيود خلال الفتحة المستطيلة سيكون أوسع عموديًا؛ لأنّ الفتحة أصغر في ذلك الاتجاه.

(ب) بالنسبة إلى السماعة. نمط الصّوت المطلوب هو الذي يمتد أفقيًا. لذا. يفضل أن يكون طويلًا وضيقًا (أدر الشّكل 24 – 23 بمقدار 90°).

الشّكل 24 – 23 (المثال 24-5).



6-24 محزّزة (شبكة) الحيود



الشّكل 24 – 24 محززة الحيود.

تُعرَّفُ المجموعةُ الكبيرة من الحزوز متساوية المسافات البينية بـ **محزّزة الحيود**. على الرغم من أنّ مصطلح "شبكة التّداخل" يمكن أن يكون ملائمًا أيضًا. يمكن عمل محززات الحيود بآلات دقيقة بخطوط رفيعة جدًّا على صفيحة من الزجاج. وتعمل المناطق غير الملموسة بين الخطوط كشقوق. وتخدم الشفافيات التصويرية للمحززات الأصلية كمحززات زهيدة الثمن. إنّ المحززات التي تحتوي 10،000 خط في السنتيمتر الواحد شائعة. ومفيدة جدًّا في قياس الأطوال الموجيّة بصورة دقيقة. وتُسَمّى محززةُ الحيود التي تحتوي على شقوق شبكةً منفذة. وهناك نوع آخر يُسَمّى **الشّبكة الانعكاسية**. وهي تصنع بتخطيط الخطوط على سطح معدنيّ أو زجاجيّ. حيث ينعكس عنه الضّوء ليتم تحليله. التحليل هو نفسه كما في الشبكة المنفذة التي سنناقشها الآن.

إنّ تحليل محززة الحيود يشبه كثيرًا تحليل تجربة الشّقّ المزدوج ليونغ. نفرض أشعة متوازية تسقط على محززة كما هو مبين في (الشّكل 24 – 24). ونفرض كذلك أنّ الشّقّوق ضيقة لدرجة كافية بحيث ينشر كلّ شقّ الضّوء بزاوية واسعة على شاشة بعيدة عن هذه الحزوز كلّها. تتداخل الأشعةُ الضوئية التي تعبر كلّ شقّ دون انحراف

$(\theta = 0°)$ تداخلا بناءً لينتج خطّ لامع في مركز الشاشة. وينتج كذلك تداخل بناء عند زاوية θ بحيث تسير الأشعة القادمة من فتحات متجاورة مسافة إضافية $\Delta l = m\lambda$. حيث m عدد صحيح. إذا كانت d المسافة بين كلّ فتحتين متجاورتين. فسنرى عندئذٍ من (الشّكل 24 – 24) أنّ $\Delta l = d\sin\theta$. و

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d}, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots \qquad \text{[الهدب اللامعة الرئيسة]} \quad \mathbf{(24-4)}$$

الهدب اللامعة في محززة الحيود ($m =$ الرتبة).

هو المعيار للحصول على هدبة لامعة. إنّ هذه المعادلة هي نفسها للشق المزدوج. كما أنّ m تسمى الرتبة في النمط.

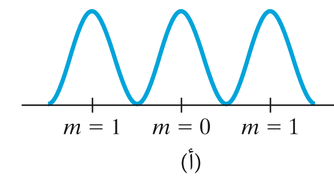
ولكنّ هناك فرقًا مهمًّا بين الشّقّ المزدوج ونمط الحزوز المتعددة. وهو أنّ الهدب اللامعة في المحززة أكثر حدّة وأضيق. لماذا؟

تنويه:
تحلل محززة الحيود باستعمال صيغ التّداخل وليس صيغ الحيود.

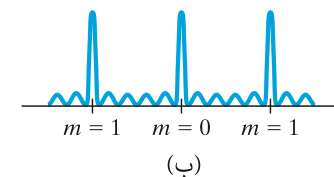
نفرض أنّنا زدنا قيمة الزاوية θ قليلًا خارج ما هو مطلوب للحصول على الهدبة اللامعة. في حالة وجود شقين فقط. فإنّ الموجتين ستكونان مختلفتين في الطور بصورة قليلة. ولذلك يحدث تداخل بناء بصورة تقريبية. وهذا يعني أنّ الهدب اللامعة ستكون أعرض (انظر الشّكل 24 – 10). وفي المحززة. فإنّ الموجات من شقّ معين. والشّقّ المجاور له لا تكون مختلفة الطور بصورة جوهرية. ولكن الموجات من شقّ معين وتلك التي من شقّ آخر على بعد عدد قليل من مئات الحزوز. يمكن أن تكون مختلفة الطور تمامًا. والضّوء كلّه أو قريبًا من ذلك يحذف بصورة زوجية بهذه الطريقة. مثلا. افرض أنّ الزاوية θ تختلف قليلًا عن قيمتها عند الرتبة الأولى. بحيث إنّ الزيادة في طول المسار الضوئي لزوج من الفتحات المتجاورة لا يساوي λ بالضبط. بل 1.0010λ. الموجة من خلال فتحة. والموجة من فتحة أخرى على بعد 500 فتحة منها سيكون بينهما فرق في المسار الضوئي يساوي $1.5000\lambda = (500)(0.001\lambda) + 1\lambda$؛ أي $1\frac{1}{2}$ طول الموجة. لذا. سوف تفنى الموجتان. كما أنّ زوجا من الفتحات تحت كلّ واحدة من الزوج السابق سوف يفنى أيضا؛ أي أنّ الضّوء من الفتحة 1 والفتحة 501 سوف يفنى. كما سيفنى الضّوء من الفتحة 2 والفتحة 502 . وهكذا. وحتى لزاوية صغيرة جدًّا* تقابل فرقا في المسار الضوئي $\frac{1}{1000}\lambda$ سيكون هناك فناء كذلك. وبالتالي. ستكون الهدب اللامعة ضيقة جدًّا. وكلما كان عدد الحزوز أكبر في المحززة. تكون قمم الهدب أكثر دقة (انظر الشّكل 24 – 25). ولأنّ المحززة تنتج هدبًا أكثر حدّة ولمعانًا أكثر من الشّقّ المزدوج. لذلك فهي أداة أكثر دقة لقياس الأطوال الموجيّة.

لماذا تنتج الشقوق الكثيرة قمم أكثر وضوح.

الشّكل 24 – 25. شدة الضّوء كدالة بزاوية النظر θ (أو الموقع على الشاشة) لـ (أ) شقّ مزدوج. (ب) ست فتحات. لمحززة الحيود، عدد الحزوز كبير جدًّا ($\approx 10^4$) وتكون الهدب أكثر حدة.



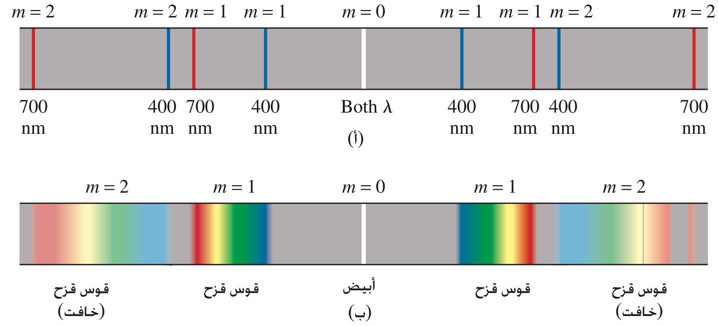
(أ)



(ب)

افرض أنّ الضّوء الساقط على المحززة ليس وحيد اللون. بل يتكون من موجتين أو أكثر محددة الأطوال الموجيّة. عندها. لكلّ رتبة ما عدا $m = 0$. تنتج كلّ موجة هدبًا لامعة عند زوايا مختلفة (الشّكل 24 – 26أ). تمامًا كما في الشّقّ المزدوج. وإذا سقط على المحززة ضوء أبيض. فالهدبة المركزية $(m = 0)$ ستكون هدبة لامعة بيضاء حادة.

* بالاعتماد على العدد الكلّي للحزوز. قد يكون هناك فناء تام أو غير تام عند هذه الزاوية. لذا. ستكون هناك قمم (هدب) صغيرة بين الهدب الرئيسة (انظر الشّكل 24 – 25 ب). ولكنها تكون ضعيفة. وصعبة الرؤية.



الشّكل 24 – 26 أطياف ناتجة بواسطة محززة: (أ) موجتان طولاهما 400 nm، و 700 nm؛ (ب) ضوء أبيض. الرتبة الثانية ستكون أكثر خفوتا من الرتبة الأولى. (الرتب الأعلى ليست مبينة). إذا كانت الأبعاد بين الحزوز صغيرة بما يكفي، فإنّ الرتب الثانية والأعلى ستكون مفقودة.

أمّا للرتب الأخرى فسيكون هناك طيفٌ محدّدٌ للألوان ينتشر على زوايا ذات عرض معين. (الشّكل 24 – 26ب). ولأنّ محززة الحيود تباعد الضّوء إلى مركباته الموجيّة، فإنّ النمط الناتج يسمى **الطّيفَ**.

المثال 24-6 محززة الحيود: خطوط

حدّد المواقع الزاوية للهدب اللامعة للرتبتين الأولى والثانية للأطوال الموجيّة 400 nm، و 700 nm الساقطة على المحززة التي تحتوي 10,000 خط / cm.

النّهج: نجد أولا المسافة d بين الشّقوق؛ إذا كان في المحززة عددٌ من الخطوط N في 1 m، فإنّ المسافة بين كلّ خطين متجاورين $d = 1/N$ m. ثم نستعمل (المعادلة 24 – 4) لحساب الزوايا للموجتين للرتبة $m = 1$ و$m = 2$.

الحلّ: تحتوي المحززة على 1.00×10^4 lines/cm $= 1.00 \times 10^6$ lines/m، وهذا يعني أنّ $d = (1/1.00 \times 10^6)\,\text{m} = 1.00 \times 10^{-6}\,\text{m} = 1.00\,\mu\text{m}$

في الرتبة الأولى $(m = 1)$ تكون الزوايا

$$\sin\theta_{400} = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(4.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.400$$

$$\sin\theta_{700} = \frac{(1)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.700$$

لذلك $\theta_{400} = 23.6°$ و $\theta_{700} = 44.4°$. وفي الرتبة الثانية،

$$\sin\theta_{400} = \frac{2\lambda}{d} = \frac{(2)(4.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.800$$

$$\sin\theta_{700} = \frac{(2)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 1.40$$

وهكذا فإنّ $\theta_{400} = 53.1°$. ولكن الرتبة الثانية لـ $\lambda = 700$ nm ليست موجودة؛لأنّ جيب الزاوية يجب ألا يزيد على 1. ولن تظهر رتب أعلى.

المثال 24-7 تطابق (تراكب) الأطياف

يحتوي ضوء أبيض على الموجات بأطوال من 400 nm إلى 750 nm. ويسقط على محززة حيود تحتوي على 4000 lines/cm برهن أنّ الضّوء الأزرق بطول موجة $\lambda = 450$ nm في الرتبة الثالثة يتطابق (يتراكب) مع الضّوء الأحمر بطول موجة 700 nm في الرتبة الثانية.

النّهج: باستعمال (المعادلة 24-4)، احسب الاوضاع الزاوية للقيمة العظمى للضوء الأزرق عند $m = 2$, $m = 3$ من الوضع الاحمر.

الحل: ثابت المحززة $d = (1/4000)\,\text{cm} = 2.50 \times 10^{-6}\,\text{m}$.

ينتج الضّوء الأزرق ذو الرتبة الثالثة عند الزاوية

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(3)(4.50 \times 10^{-7}\,\text{m})}{(2.50 \times 10^{-6}\,\text{m})} = 0.540$$

في حين ينتج الضّوء الأحمر في الرتبة الثانية عند الزاوية

$$\sin\theta = \frac{(2)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{(2.50 \times 10^{-6}\,\text{m})} = 0.560$$

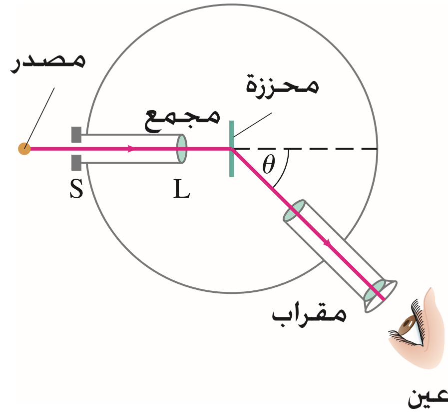
وهي زاوية أكبر. لذا، يتطابق الضّوء ذو الرتبة الثانية على بداية الضّوء ذي الرتبة الثالثة.

التمرين C: كم خطًّا في كلّ سنتيمتر تكون في محزّزة الحيود التي تنتج الرتبة الأولى للموجة 633 nm عند °18؟

التمرين D: إنّك تشاهد الطّيفين الناتجين للضّوء الأحمر الذي يشع على محززتين مختلفتين. تكون الخطوط من الطّيف A متباعدة أكثر من الخطوط في الطّيف B. أيّ من المحززتين فيها خطوط أكثر لكلّ سم؟

* 24-7 مقياس الطّيف والتحليل الطّيفي (المطيافية)

مقياس الطّيف أو المطياف، الشّكل (24 – 27)، هو جهاز لقياس الأطوال الموجيّة باستعمال محززة الحيود (أو المنشور) لفصل الأطوال الموجيّة المختلفة للضّوء. يمرّ الضّوء من المصدر عبر شقّ ضيق S في "المجمّع". يكون الشّقّ في البؤرة للعدسة L. ولهذا، يسقط ضوء متوازٍ على "المحززة". ويعمل التلسكوب المتحرّك على تجميع هذه الأشعة.



الشّكل 24 – 27 مقياس الطّيف أو المطياف.

لا يرى شيء في التلسكوب (المنظار) حتى يوضع عند زاوية θ تتفق مع قمّة الحيود (تستعمل عادة الرتبة الأولى) لطول موجة صادرة عن المصدر الضوئي. يمكن قياس الزاوية θ بدقة عالية. ولذلك، يمكن تحديد طول الموجة بدقة متناهية باستعمال (المعادلة 24 – 4):

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin \theta$$

حيث m عدد صحيح يمثل الرتبة، أمّا d فهي المسافة بين حزوز الشبكة. الخط الذي تلاحظه في التلسكوب (المنظار) هو في الواقع خيال للفتحة S. وكلما كانت الفتحة أضيق، كان الخط أضيق – ولكن أكثر خفوتًا –. واستطعنا قياس موقعه الزاوي بدقة أكبر أيضا. وإذا احتوى الضّوء مدى متصلا من الموجات، عندها نرى طيفًا متصلا في التلسكوب.

في كثير من مقاييس الطّيف، تستعمل محززة عاكسة، وأحيانًا منشور يعمل بسبب التّفريق اللوني (البند 24 – 4)، حيث ينحرف الضّوء ذو الأطوال الموجيّة المختلفة بزوايا مختلفة. (المنشور ليس أداة خطية، ولذلك يحتاج إلى معايرة).

وهناك استعمال مهم للمطياف يتمثّل في التّعرف إلى الذرات والجزيئات.

الأطياف الخطية

عند تسخين غاز أو تمرير تيار كهربائيّ فيه، يشع الغاز طيفًا خطيًّا خاصًّا به. أي تصدر أطوال موجية محددة فقط. وهذه تختلف لمختلف العناصر والمركبات.* يبين (الشّكل 24 – 28) الأطياف الخطية لعدد من العناصر في الحالة الغازية. تحدث الأطياف الخطية فقط للغازات عند درجة حرارة مرتفعة، وضغط وكثافة قليلين. ينتج الضّوءَ من الأجسام الصلبة المسخنة، مثل فتيل المصباح الكهربائي وحتى من جسم غازي عالي الكثافة، كالشّمس، **طيفًا متصلا** متضمنًا مدى واسعًا من الأطوال الموجيّة.

كما يبين (الشّكل 24 – 28) أيضًا طيف الشّمس المتصل "الذي يحتوي عددًا من الخطوط المعتمة (فقط أكثرها شهرة هي المبينة)، والتي تسمى **خطوط الامتصاص**. تستطيع الذرات والجزيئات امتصاص الضّوء عند الأطوال الموجيّة التي تشعها عادة. إنّ خطوط امتصاص طيف الشّمس تعود لامتصاص الذرات والجزيئات في المحيط الخارجي الأبرد من الشّمس، وكذلك من ذرات غلاف الأرض الجويّ وجزيئاته. إنّ التحليل الدقيق لهذه الآلاف من الخطوط يدلّ على أنّ ثلثي العناصر على الأقلّ موجودة في الغلاف الجوي الشّمسيّ. ويمكن تحديد وجود العناصر في الغلاف الجوي لكواكب أخرى في الفضاء النجمي والنجوم أيضًا بالتحليل الطّيفي.

* لقد كان السببُ في أنّ الذرات والجزيئات تشع أطيافًا خطية سرًّا غامضًا لسنوات كثيرة، وقد قام بدور في تطوير نظرية الكم الحديثة، كما سنرى في (الفصل 27).



الشّكل 24 – 28 الأطياف الخطية للعناصر المذكورة، وطيف من الشّمس يبين خطوط الامتصاص.

إنّ التحليل الطّيفي مفيد في تحديد وجود أنواع معينة من الجزيئات في عينات المختبر. حيث قد يكون التحليل الكيميائيّ صعبًا. فمثلاً، يمتصّ المركب الحيوي DNA وأنواع مختلفة من البروتينات الضّوء في مناطق معينة من الطّيف (على سبيل المثال في المنطقة فوق البنفسجيّة UV). وفي العادة، تكون المادة المراد اختبارها في هيئة محلول، وتوضع في طريق حزمة ضوئية وحيدة اللون يتم اختيار طول موجتها بواسطة محززة حيود أو منشور. إنّ مقدار الامتصاص مقارنة مع محلول عياري (دون وجود العينة)، يمكن أن يدل ليس فقط على وجود نوع من الجزيئات، بل على تركيزه أيضًا.

تطبيق الفيزياء

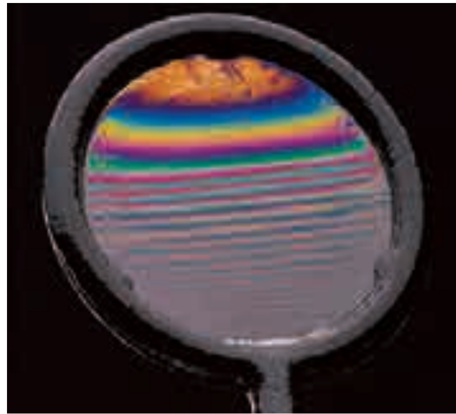
تحليل كيميائيّ وحيويّ بواسطة التحليل الطّيفيّ.

إنّ إشعاع الضّوء وامتصاصه يحصل كذلك خارج منطقة الضّوء المرئيّ في الطّيف، مثل منطقتي UV و IR. يمتص الزجاج الضّوء في هذه المناطق. لذا، تستخدم المحززات العاكسة والمرايا بدلا من العدسات. وتستخدم للكشف أيضًا أفلام وكواشف خاصة.

8-24 التّداخل في الأغشية الرقيقة

يعطي تداخل الضّوء ظواهر كثيرة في الحياة اليومية مثل الألوان اللامعة المنعكسة عن فقاعات الصابون، وأغشية الزيت الرقيقة فوق سطح الماء. (الشّكل 24 – 29). في هذه الحالات وأخرى غيرها، تتكوّن الألوان نتيجة تداخل بنّاء بين الضّوء المنعكس من سطحي الغشاء الرقيق. ويكون هذا الأثر موجودًا فقط إذا كان سمك الغشاء في حدود الطّول الموجيّ للضّوء. أمّا إذا كان سمك الغشاء أكبر من عددٍ قليلٍ من الطّول الموجيّ، فإنّ هذا الأثر يتلاشى.


(أ)

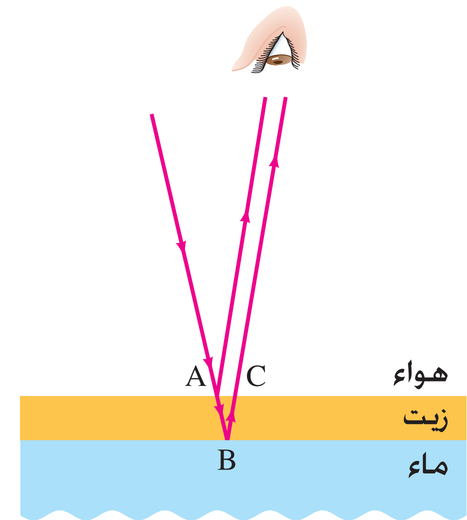

(ب)


(جـ)

الشّكل 24 – 29 أنماط تداخل في غشاء رقيق كما تبدو في (أ) فقاعات صابون. (ب) غشاء رقيق من ماء صابوني. (جـ) طبقة رقيقة من الزيت فوق سطح ماء بركة في الطريق.

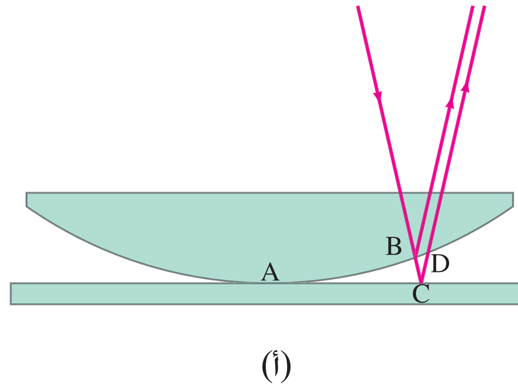
إذا رغبت في معرفة كيفية حدوث **تداخل الغشاء الرقيق** هذا: تأمّل سطحًا منبسطًا من الماء تعلوه طبقة رقيقة منتظمة من مادة أخرى. مثلًا زيت معامل انكساره أقلّ من معامل انكسار الماء (سنرى سبب هذا الافتراض بعد قليل)؛ انظر (الشّكل 24 – 30). افرض للحظة أنّ الضّوء الساقط ذا طول موجة واحد. إنّ جزءًا من الضّوء الساقط سينعكس عند A على السطح العلوي. وجزءٌ من الضّوء النافذ ينعكس عند B على السطح السفلي. إنّ الضّوء المنعكس على السطح السفلي يجب أن يسير مسافة إضافية ABC. وإذا كان هذا الفرق في المسار الضوئيّ ABC يساوي عددًا صحيحًا من الطّول الموجيّ في الغشاء (λ_n). فسوف تصل الموجتان إلى العين متفقتين في الطور وتتداخلان تداخلا بنّاءً. ولكن إذا كان ABC مساويًا لـ $\frac{1}{2}\lambda_n, \frac{3}{2}\lambda_n$. وهكذا. فإنّ الموجتين تكونان مختلفتين في الطور بصورة تامة. ويحدث تداخل هدّام؛ أي أنّ المساحة AC على سطح السّائل تكون معتمة. طول الموجة λ_n هو طول الموجة في الغشاء: $\lambda_n = \lambda/n$. حيث n هو معامل انكسار الغشاء. و λ هو طول الموجة في الفراغ. انظر (المعادلة 24 – 1). عند سقوط الضّوء على مثل هذا الغشاء. فإنّ فرق المسار الضوئيّ ABC سوف يساوي λ_n (أو $m\lambda_n$. حيث m عدد صحيح) فقط لطول موجة واحدة عند زاوية نظر واحدة. إنّ اللون الخاص بـ λ (λ في الهواء) سوف يبدو لامعًا. وللضوء عند زاوية مختلفة قليلاً. سوف يكون فرق المسار الضوئي ABC أطول أو أقصر. ولون آخر سوف يتداخل تداخلا بناءً. وهكذا بالنسبة لمصدر ممتد (غير نقطي) يصدر ضوءًا أبيض. فإنّ سلسلة من الألوان البراقة سوف تظهر الواحد تلو الآخر. كما أنّ التغيرات في سمك الغشاء سوف تغير فرق المسار الضوئي ABC. وهكذا تؤثر في اللون الذي ينعكس بقوة.

وعند وضع سطح زجاجي منحنٍ في حالة تماس مع سطح منبسط من الزجاج. (الشّكل 24 – 31). فإنّ سلسلة من الحلقات متحدة المركز تبدو عند سقوط ضوء وحيد اللون من الأعلى.



الشّكل 24 – 30 الضّوء المنعكس من السّطحين العلوي والسفلي لغشاء رقيق من الزيت فوق سطح الماء. يبين هذا التحليل أنّ الضّوء يسقط عموديًا تقريبًا على السطح، ولكن هنا يبدو مزاحًا بزاوية لتتمكن من عرض كلّ شعاع.

الشّكل 24 – 31 حلقات نيوتن



(أ)



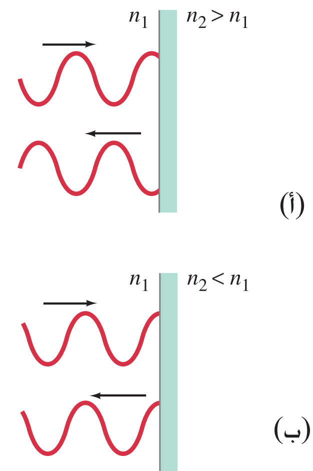
(ب)

حلقات نيوتن

تُسَمّى هذه "**حلقات نيوتن**"* وتعود إلى التّداخل بين الأشعة المنعكسة عن السطحين العلوي والسفلي لفجوة الهواء الرقيقة بين قطعتي الزجاج. وبسبب أنّ هذه الفجوة (التي تكافئ غشاء رقيقًا) تزداد في السمك من نقطة التماس المركزية نحو الحواف. فإنّ الفرق في طول المسار الضوئي (BCD) يتغير؛ حيث يساوي $0, \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda$ وهكذا. وهو يعود إلى التّداخلين البنّاء والهدّام. وهذا يؤدي إلى ظهور سلسلة الحلقات المضيئة والمعتمة المبينة في (الشّكل 24 – 31 ب).

تكون نقطةُ التماس لسطحي الزجاج (A في الشّكل 24 – 31أ) معتمةً في (الشّكل 24 – 31 ب). وبما أنّ فرق المسار الضوئي يساوي صفرًا هنا. فإنّ تحليلنا السابق يقترح أنّ الشّعاعين يجب أن يكونا في الطور نفسه. وأنّ هذه النّقطة المركزية تكون مضيئة. ولكنها معتمة. وهذا يدلُّ على أنّ شيئًا آخر يحدث هنا. وهو أن يكون الشّعاعان مختلفين في الطور. وهذا يحدث فقط لأنّ الموجات عند الانعكاس تُقْلَب رأسا على عقب – القمة تصبح قاعا – انظر (الشّكل 24 – 32). ونرى أنّ الموجة قد خضعت لتغير في الطور مقداره °180. أو بنصف طول موجة. وفي الواقع. فإنّ هذه التجربة وتجارب أخرى تدلّ على ذلك. *عند السقوط العمودي. يتغيّر طور الشّعاع الضوئيّ المنعكس من مادة معامل انكسارها أكبر من المادة التي يسير فيها بـ °180. أو $\frac{1}{2}$ دورة*. انظر (الشّكل 24 – 32). إنّ هذا التغير في الطور يقابل تغيّرًا في المسار مقداره $\frac{1}{2}$. إذا كان معامل الانكسار أقلّ من الوسط الذي يسير فيه الضّوء فلا يحدث تغيّر.

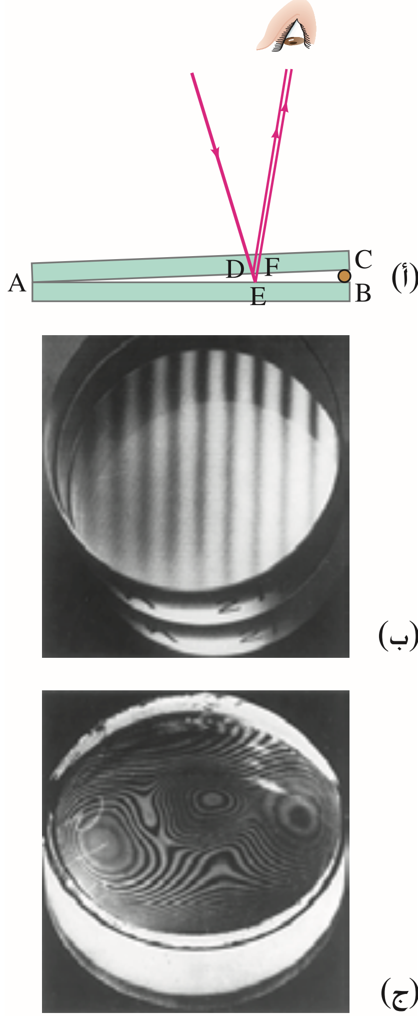
الشّكل 24 – 32 (أ) يغير الشّعاع المنعكس طوره °180 أو $\frac{1}{2}$ دورة إذا كان $n_2 > n_1$، لكن (ب) لا يحدث ذلك إذا كان $n_2 > n_1$.



* على الرغم من أنّ نيوتن وصف هذه الحلقات. إلا أنّ مشاهدتها الأولى وتفسيرها كان على يد معاصِره روبرت هوك.

وهكذا، فالشّعاع المنعكس بواسطة السّطح المنحني فوق الفجوة الهوائية في (الشّكل 24 – 31أ) لا يتغير طوره. أمّا الشّعاع المنعكس على السطح السفلي، حيث الشّعاع في الهواء يصطدم بالزجاج فيعاني تغييرا في الطور مقداره $\frac{1}{2}$ دورة. وهذا يكافئ نصف طول موجة تغير في المسار الضوئي. وعليه، فإنّ الشّعاعين المنعكسين عند نقطة التماس A لسطحي الزجاج (حيث سمك فجوة الهواء تقترب من الصفر) سيكونان مختلفين في الطور بمقدار نصف دورة ($180°$). وبهذا تتشكل بقعة معتمة. وهنا أحزمة معتمة سوف تتكوّن عندما يساوي فرقُ المسار BCD في (الشّكل 24 – 31أ)، عددًا صحيحًا من الأطوال الموجيّة. في حين تتكون الأحزمة المضيئة عندما يكون فرق المسار مساويًا $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda$، وهكذا، لأنّ التغير في الطور عند أحد السطحين يضيف فرقًا في المسار $\frac{1}{2}\lambda$ (= $\frac{1}{2}$ دورة).

ونعود على عَجَلٍ إلى (الشّكل 24 – 30)، الضّوء المنعكس على السطحين الفاصلين هواء – زيت، وزيت – ماء قد تغيرا في الطور $180°$ وهذا يكافئ تغيّرًا في المسار الضوئي $\frac{1}{2}\lambda$، لأنّنا فرضنا أنّ $n_{\text{هواء}} < n_{\text{زيت}} < n_{\text{ماء}}$؛ وبما أنّ التغيرين متساويان، فإنّ هذا لا يؤثر في تحليلنا.



الشّكل 24 – 33 (أ) الضّوء المنعكس من السطحين العلوي والسفلي لغشاء من الهواء بشكل إسفين، يتداخل مكونا أهدابا لامعة ومعتمة. (ب) النمط المشاهد عندما تكون صفيحتا الزجاج مستويتين (جـ) النمط عندما لا تكون الصفيحتان مستويتين، انظر (المثال 24 – 8).

المثال 24-8 غشاء رقيق من الهواء، إسفينيّ الشّكل

وُضِعَ سلك رفيع جدًّا قطره 7.35×10^{-3} mm بين صفيحتين مستويتين كما في (الشّكل 24 – 33أ). يسقط ضوء طول موجته في الهواء 600 nm (كما هو مبين) عموديًا على الصفيحتين. وترى سلسلة من الحزم المضيئة والمعتمة. (الشّكل 24 – 33). ما عدد الهدُب المضيئة والمعتمة في هذه الحالة؟ هل المساحة المجاورة للسلك مضيئة أم معتمة؟

النّهج: نحتاج إلى اعتبار أثرين: أ- فروق المسارات بين الأشعة الضوئية المنعكسة من السطحين القريبين (إسفين الهواء بين صفيحتي الزجاج). ب- $\frac{1}{2}$ الدورة في الطور النّاتج من الانعكاس على السطح السفلي (النّقطة E في الشّكل 24 – 33أ)، حيث الأشعة في الهواء تدخل الزجاج. وبسبب التغير في الطور على السطح السفلي، فإنّ هناك هدبة معتمة ستكون عند فرق المسار $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ وهكذا. وبما أنّ الأشعة عمودية على الصفيحتين، فإنّ فرق المسار هو $2t$، حيث t هو سمك فجوة الهواء عند أيّ نقطة.

الحلّ: تتكون الهُدُبُ المعتمة عندما

$$2t = m\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots.$$

أمّا الهدب المضيئة فتتكون عندما $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$، حيث m عدد صحيح. عند موضع السلك يكون $t = 7.35 \times 10^{-6}$ m. وعند هذه النّقطة ستكون $2t/\lambda = (2)(7.35 \times 10^{-6}\text{ m})/(6.00 \times 10^{-7}\text{ m}) = 24.5$ وتساوي 24.5 طول موجة. وبما أنّ هذا نصف عدد صحيح، فالمساحة المحاذية لمكان السلك ستكون مضيئة. سيكون هناك 25 هدبة معتمة، تقابل فرقًا في المسار $0\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \cdots, 24\lambda$ بما في ذلك الهدبة عند خط التماس ($m = 0$) A وبينها سيكون 24 خطًا مضيئًا إضافة لآخر واحدة عند النهاية، أي 25.

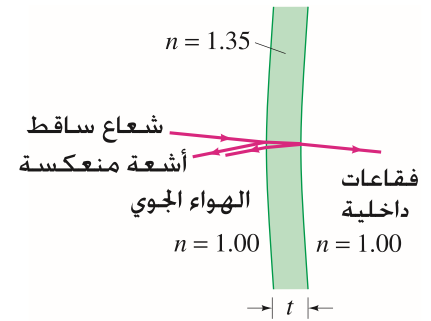
ملحوظة: الهُدُبُ المضيئة والمعتمة ستكون خطوطًا مستقيمة فقط إذا كانت الصفيحتان الزّجاجيتان مستويتين تمامًا. وإنْ لم تكونا كذلك، فإنّ نمط التّداخل سيكون مختلفًا. (الشّكل 24 – 33 جـ). لذلك، نرى وسيلة دقيقة جدًّا لاختبار استواء السّطوح الزّجاجية. إنّ سطوح العدسات الكروية تختبر بوضعها فوق سطوح مستوية واختبار تكوُّن حلقات نيوتن الدائرية (الشّكل 24 – 31ب).

إذا ملئ الإسفين بين السّطحين الزّجاجيين في (المثال 24 – 8) بمادة شفافة عدا الهواء كالماء مثلا، فإنّ نمط الحيود يُزاح لأنّ طول موجة الضّوء يختلف في الماء. وفي مادة معامل انكسارها n ، فإنّ طول الموجة هو $\lambda_n = \lambda/n$، حيث λ طول الموجة في الفراغ (انظر المثال 24 – 1). مثلاً، لو ملئ الإسفين و (المثال 24 – 8) بالماء، فإنّ $\lambda_n = 600\text{ nm}/1.33 = 450\text{ nm}$. وبدلاً من 25 هدبة، سنرى 33.

تطبيق الفيزياء
اختبار استواء سطوح الزّجاج

وإذا أسقط ضوء أبيض (بدلا من الضّوء وحيد اللون) على غشاء بشكل إسفين من الهواء. (الشّكلان 24 – 31أ و 24 – 33أ) فسنرى سلسلة من الهدب الملونة. ويعود السبب في هذا إلى أنّ تداخلاً بنّاءً يحدث لمختلف الأطوال الموجيّة في الضّوء المنعكس عند سمك مختلف على امتداد الإسفين.

فقاعةُ الصابون قشرةٌ كروية رقيقة (أو غشاء) والهواء داخلها. إنّ اختلاف سمك غشاء فقاعة الصابون يؤدّي إلى ظهور الألوان اللامعة المنعكسة عنها. (هناك هواء على جانبي غشاء الفقاعة). تنتج اختلافات السمك المشابهة في الغشاء الألوان اللامعة والتي تشاهد منعكسة من طبقة رقيقة من الزيت أو الكاز على سطح بركة أو بحيرة (الشّكل 24 – 29). أي أنّ الألوان التي تبدو أكثر إضاءة تعتمد على زاوية الرؤية.



الشّكل 24 – 34 (المثال 24 – 9). الأشعة السّاقطة والمنعكسة يفترض أنها عمودية على سطح الفقاعة. وهي مبينة عند زاوية صغيرة بحيث يمكن تمييزها.

تنويه:
العلاقة الرياضية غير كافية، يجب أن تختبر تغيرات الطور عند السّطوح.

المثال 24-9 سمك غشاء فقاعة الصابون.

تبدو فقاعة صابون خضراء $(\lambda = 540\ \text{nm})$ عند نقطة على سطحها الأمامي الأقرب للناظر. ما أقلّ سمك لغشاء هذا الفقاعة ؟ افرض $n = 1.35$.

النّهج: افرض أنّ الضّوء ينعكس عموديًا من النّقطة على السطح الكروي القريب من الناظر. (الشّكل 24 – 34). ينعكس الضّوء كذلك من السطح الداخلي لغشاء فقاعة الصابون كما هو مبين. فرق المسار الضوئي بين هذين الشّعاعين المنعكسين هو $2t$، حيث t هو سمك غشاء الفقاعة. يتغير الضَّوء المنعكس على السطح الأول (الخارجي) طوره $180°$ (معامل انكسار الصابون أكبر من معامل انكسار الهواء) أمّا الانعكاس على السطح الثاني (الداخلي) فلا يتغير طوره. ولتحديد السمك t للحصول على تداخل بناء؛ يجب أن نستعمل طول الموجة في الصابون $(n = 1.35)$.

الحلّ: تغير الطور $180°$ على أحد السطحين فقط يكافئ $\frac{1}{2}\lambda$ تغيرًا في المسار. لذلك، يكون الضَّوء الأخضر لامعًا عندما يكون أقلّ مسار ضوئيّ هو $\frac{1}{2}\lambda_n$. وهكذا $2t = \lambda/2n$، أي

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(540\ \text{nm})}{(4)(1.35)} = 100\ \text{nm}$$

وهذا هو أقلّ سمك.

ملحوظة: سوف يبدو السّطح الأماميّ أخضر اللون إذا كانت $2t = 3\lambda/2n$ أيضًا. وبشكل عام إذا كانت $2t = (2m + 1)\lambda/2n$، حيث m عدد صحيح. لاحظ أنّ الأخضر يبدو في الهواء. لذا، $\lambda = 540\ \text{nm}$ (وليس λ/n)

تطبيق الفيزياء
طلاء العدسات

هناك تطبيقٌ مهمٌّ لتداخل الأغشية الرقيقة هو طلاء الزجاج ليكون "غير عاكس" خاصة في العدسات. يعكس سطح الزجاج نحو 4% من الضّوء الساقط عليه. وقد تحتوي آلات التصوير الحديثة، والمجاهر، والأجهزة الضوئية الأخرى ست إلى عشر عدسات رقيقة. إنّ الانعكاس عن كلّ هذه السّطوح قد يقلّل الضَّوء لصورة ملموسة. كما أنّ الانعكاسات المتعددة تنتج خلفية ضبابية تقلل من نوعية الصورة. وعند تقليل الانعكاس يزداد النفاذ. كما أنّ طلاءً رقيقًا جدًّا على سطوح العدسات يمكن أن يقلل الانعكاس بصورة ملموسة؛ يختار سمك الغشاء بحيث يتداخل الضَّوء (على الأقل طول موجة معينة) المنعكس على السطحين الأمامي والخلفي تداخلًا هدّامًا. ويعتمد مقدار الانعكاس على السطح الفاصل على الفرق في معاملات الانكسار بين المادتين. وبصورة مثالية، يكون معامل الانكسار لمادة الطلاء مساويًا لـ $(= \sqrt{n_1 n_2})$ المتوسط الهندسي لمعامل الهواء والزجاج، بحيث يكون مقدارُ الانعكاس على كلّ من السطحين متساويًا. عندها يحصل التّداخل الهدّام بصورة كاملة تقريبًا لطول موجة واحدة اعتمادًا على سمك الطلاء. إنّ الموجات القريبة سوف تتداخل تداخلا هدّامًا بصورة جزئية، لكن طلاء واحدًا لا يمكن أن يحذف الانعكاسات كلّها للموجات جميعا. إلا أنّ طبقة واحدة يمكن أن تقلل الانعكاس من 4% إلى 1% للضّوء الساقط. ويصمم الطلاء عادة بحيث يحذف منتصف الطّيف المنعكس (نحو 550 nm). وأطراف الطّيف – الأحمر والبنفسجيّ – سوف لا تقل كثيرًا. وبما أنّ مزيج الأحمر والبنفسجيّ يعطي الضّوء الأرجواني، لذلك يكون الضّوء المنعكس عن هذه العدسات أرجوانيًا (الشّكل 24 – 35).

العدسات التي تحتوي نوعين أو ثلاثة من الطلاء المنفصل يمكن أن تقلل مدى واسعًا من الأطوال الموجيّة المنعكسة بصورة فاعلة.

الشّكل 24 – 35. عدسة مطلية. لاحظ لون الضّوء المنعكس من سطحها الأمامي.



طريقة حلّ الأسئلة: التّداخل

1. تعتمد آثار التّداخل على الوصول المتزامن لموجتين أو أكثر عند النّقطة نفسها في الفراغ.

2. يحدث **التّداخل البنّاء** عندما تصل الموجات المتفقة في الطور مع بعضها: تصل قمة إحدى الموجات في الوقت نفسه الذي تصل فيه قمة موجة ثانية. تضاف عندها الاتساعات ليكون هناك اتساع أكبر. يحدث التّداخل البناء أيضًا عندما يكون الفرق في المسار مساويًا بالضبط لطول موجة تمامًا، وأيّ عدد صحيح من مضاعفات طول الموجة: $1\lambda, 2\lambda, 3\lambda$

3. ينتج **التّداخل الهدّام** عندما تصل قمة إحدى الموجتين لحظة وصول قاع الموجة الثانية. تضاف الاتساعات، لكنها ذات إشارات مختلفة ولذلك ينقص الاتساع الكلّي إلى الصفر إذا كان الاتساعان متساويين. ينتج التّداخل الهدام دائمًا عندما يكون فرق الطّول نصف دورة، أو فرق المسار نصف عدد صحيح من الأطوال الموجيّة. وهكذا يكون الاتساع الكلّي صفرًا، إذا وصلت موجتان متماثلتان بينهما فرق في الطور مقداره نصف طول موجة، أو $(m + \frac{1}{2})\lambda$، حيث m عدد صحيح.

4. للتداخل في الغشاء – الرقيق، هناك نصف طول موجة فرق إضافي في المسار ينتج عندما ينعكس الضَّوء من وسط أكثف ضوئيًّا (ينتقل الضَّوء من وسط معامل انكساره أقلّ إلى وسط معامل انكساره أكبر).

المثال 24-10 طلاء غير عاكس

ما سمك طلاء ضوئيّ مكوَّن من MgF_2 والذي معامل انكساره $n = 1.50$. ويصمم لحذف الضَّوء المنعكس لطول موجيّ (في الهواء) نحو 550 nm عندما يسقط عموديًا على الزجاج $n = 1.50$؟

النّهج: نتبع بدقّة الطريقة المتبعة في إرشادات حلّ المسائل المذكورة آنفا.

الحلّ:

(1) آثار التّداخل: نأخذ شعاعين ينعكسان من السطحين الأمامي والخلفي لطلاء العدسة كما في (الشّكل 24 – 36). ونرسم الشّعاعين بصورة غير كروية على العدسة كي نرى كلا منهما. سوف يتداخل هذان الشّعاعان معًا.

(2) التّداخل البنّاء: نريد حذف الضَّوء المنعكس. لذا لا نأخذ التّداخل البناء في الحسبان.

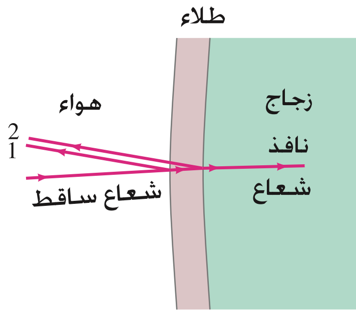
(3) التّداخل الهدّام: لحذف الانعكاس: نريد الشّعاعين 1 و 2 ليختلفا في الطور بنصف دورة بحيث يتداخلان تداخلًا هدّامًا. فرق الطور يعزى إلى فرق المسار $2t$ الذي ينتقله الشّعاع 2 بالإضافة لأيّ تغير في الطور في أيّ من الشّعاعين بسبب الانعكاس.

(4) تغير الطور بسبب الانعكاس: يتغير طور الشّعاعين 1 و 2 بمقدار $\frac{1}{2}$ دورة عند انعكاسهما عن السّطحين الأمامي والخلفي للطلاء على الترتيب (يزداد معامل الانكسار عند كلا السّطحين). لذا ليس هناك تغير حاصل للطور بسبب الانعكاسات. وسيكون فرق الطور الحاصل بسبب المسار الإضافي $2t$ الذي يتخذه الشعاع 2 من خلال الطلاء حيث $n = 1.38$. ولكننا نرغب في أن تكون قيمة $2t$ مساوية لـ $\frac{1}{2}\lambda_n$ حتى يحدث التداخل الهدام. حين تكون $\lambda_n = \lambda/n$ هي طول الموجة في الطلاء. وعندما تصبح $2t = \lambda_n/2 = \lambda/2n$ عندئذٍ

$$t = \frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(550\ \text{nm})}{(4)(1.38)} = 99.6\ \text{nm}$$

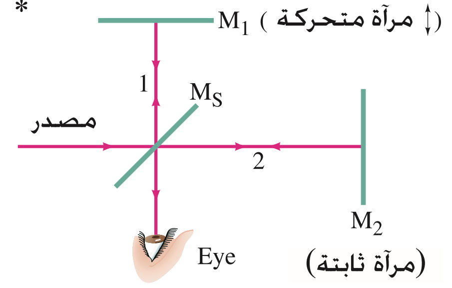
ملحوظة: يمكننا وضع $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_n$. حيث m عدد صحيح. أقلّ سمك $(m = 0)$ يختار عادة لأنّ التّداخل الهدّام سوف ينتج عند الزاوية الأوسع.

ملحوظة: ينتج التّداخل الهدّام بصورة كاملة فقط لطول موجة الضَّوء المعطاة. أمّا الموجات الأطول والأقصر فستحذف بصورة جزئيّة.



الشّكل 24 – 36 (المثال 24 – 10). الشّعاع الساقط ينعكس جزئيًّا على السّطح الأماميّ لطلاء العدسة (الشعاع 1) وينعكس جزئيًّا مرة أخرى على السّطح الخلفيّ للطلاء (الشعاع 2)، مع معظم الطّاقة المنتقلة مع الشّعاع النافذ إلى الزجاج.

9-24 مقياس تداخل ميكلسون *

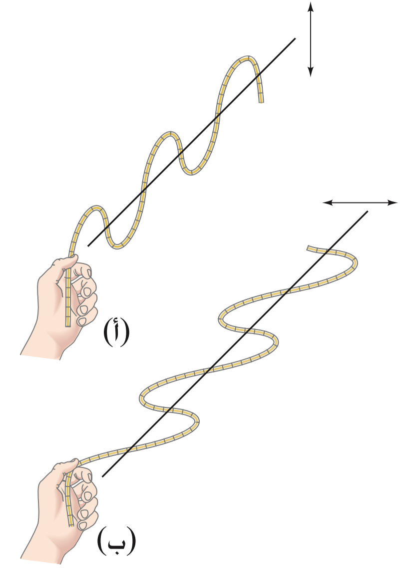


الشّكل 24 – 37 جهاز تداخل ميكلسون.

هناك جهازٌ مفيدٌ يتضمّن تداخل الموجات، هو مقياس تداخل ميكلسون (الشّكل 24 – 37)* الذي اخترعه الأمريكي ألبرت ميكلسون (البند 22 – 4). ضوء وحيد اللون من نقطة منفردة على مصدر ممتد يبدو ساقطًا على مرآة نصف مفضضة M_S. **مُقسِّم الحزمة الضوئية** هذا، المرآة M_S، عليها طبقة رقيقة من الفضة تعكس نصف الضّوء الذي يسقط عليه، وبهذا، ينفذ نصفُ الحزمة الضوئية إلى مرآة ثابتة M_2، حيث ينعكس نحو الخلف. أمّا النصف الثاني فينعكس بواسطة M_S باتجاه المرآة M_1 القابلة للحركة (بواسطة برغيّ مسنّن بدقة)، حيث ينعكس أيضًا نحو الخلف. وفي أثناء عودته، يمرّ جزء من الشّعاع 1 خلال M_S ليصل إلى العين؛ في حين ينعكس جزء من الشّعاع 2، عند عودته، بواسطة M_S إلى العين. إذا كان المساران الضوئيان متماثلين، فالشّعاعان المترابطان يدخلان العين ليتداخلا تداخلاً بنّاءً، مع ظهور هدب لامعة. إذا حركت المرآة المتحركة مسافة $\lambda/4$، فإنّ أحد الشّعاعين سيسير مسافة أكثر من الآخر بمقدار $\lambda/2$ (لأنّه يسير مسافة $\lambda/4$ ذهابًا وإيابًا). في هذه الحالة، سوف تتداخل الموجتان تداخلا هدّامًا، وسوف تبدو الهدبة معتمة. وعند إزاحة المرآة M_1 أكثر، سوف نحصل على إضاءة مرة أخرى (إذا كان فرق المسار λ)، ثم عتمة، وهكذا.

وباستخدام هذه الجهاز، يمكن إجراء أقيسة للطول بصورة دقيقة. إنّ تحريك المرآة M_1 بمسافة $\frac{1}{4}\lambda$ يعطي اختلافًا واضحًا بين الضّوء والعتمة. إذا كانت $\lambda = 400\ nm$، فهذا يعني دقة مقدارها $100\ nm$، أو $10^{-4}\ mm$ وإذا أميلت المرآة M_1 قليلا، فإنّ الهدب تبدو سلسلة من الخطوط المضيئة والمعتمة أو "الهدب". وبتحديد عدد الهدب أو أجزائها، نستطيع إجراء أقيسة دقيقة جدًّا للطول.

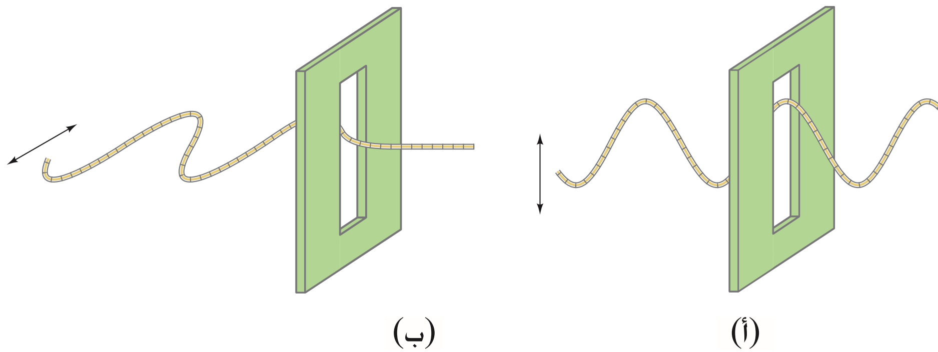
10-24 الاستقطاب

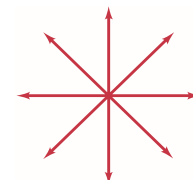


الشّكل 24 – 38، الموجات العرضية في حبل مستقطبة (أ) في مستوى عموديّ (ب) في مستوى أفقيّ.

إنّ إحدى خصائص الضّوء المهمة والمفيدة أنّه قابلٌ للاستقطاب. فماذا يعني ذلك؟ دعنا نتفحص الموجات المنتقلة في حبل. يمكن أن نجعل الحبل يهتز في مستوى عموديّ كما في (الشّكل 24 – 38أ)، أو في مستوى أفقيّ كما في (الشّكل 24 – 38 ب).
في أيّ من الحالتين، فإنّ الموجة تُسَمّى **مستقطبة خطيًّا**، أو **مستقطبة في مستوى**؛ أي أنّ الاهتزازات تكون في مستوى.
والآن، إذا وضعنا حاجزًا يحتوي فتحة عمودية في طريق الموجة، (الشّكل 24 – 39)، فإنّ موجة مستقطبة عموديًا تمر خلال الفتحة العمودية، في حين لا تمرّ موجة مستقطبة أفقيًا. إذا استعملنا شقًّا أفقيًا، فستتوقف الموجة المستقطبة عموديًا. وإذا استعملنا نوعيّ الفتحتين، فستتوقف كلتا الموجتين بفتحة أو بأخرى. لاحظ أنّ الاستقطاب موجود فقط في الموجات العرضية، وليس في الموجات الطّولية كالصّوت؛ فالأخيرة تهتز على امتداد اتجاه الحركة، ولن يوقفها أيّ وضع للشّق.

الشّكل 24 – 39. يمرّ الضّوء المستقطب عموديًا خلال فتحة عمودية، أمّا الموجة المستقطبة أفقيًا فلن تمرّ.





الشّكل 24 – 40 اهتزاز المجال الكهربائيّ في موجة غير مستقطبة. ينتقل الضّوء إلى داخل الصفحة أو خارجها.

استنتجت نظرية مكسويل في الضّوء كموجات كهرومغناطيسيّة (EM) أنّ الضّوء يمكن أن يستقطب لأنّ الموجة (EM) عرضية. إنّ اتجاه الاستقطاب في موجة EM مستوية مستقطبة يؤخذ باتجاه المجال الكهربائي $\vec{E}$. وليس من الضروريّ أن يكون الضّوء مستقطبًا، فقد يكون غير مستقطب، وهذا يعني أنّ المصدر لديه اهتزازات في مستويات كثيرة في اللحظة نفسها، كما هو مبين في (الشّكل 24 – 40). إنّ المصباح الكهربائي العادي يشع ضوءًا غير مستقطب كما هو حال الشّمس.[†]

* هنالك أنواعٌ أخرى من مقاييس التداخل، ولكن يبقى مقياس سيكون أفضل نوع معروف.

يمكن إنتاج ضوء مستوى الاستقطاب من ضوء غير مستقطب باستعمال بلّورات معيَّنة كالتّورمالين. أو، كما هو شائع اليوم، يمكننا استعمال **صفائح مستقطبة**. (المواد المستقطبة تم اختراعها عام 1927 على يد إدوين لاند.) تتكون الصفيحة المستقطبة من جزيئات طويلة معقدة مرتبة لتكون متوازية. تتصرف مثل هذه المستقطبة كسلسلة من الشّقّوق المتوازية لتسمح لنوع واحد من الاستقطاب بالمرور خلالها دون أن يضعف. يعرف هذا الاتجاه **بمحور النفاذ** للمستقطبة. أمّا الاستقطاب العموديّ فيمتصُّ كليًّا تقريبًا بواسطة المستقطبة.

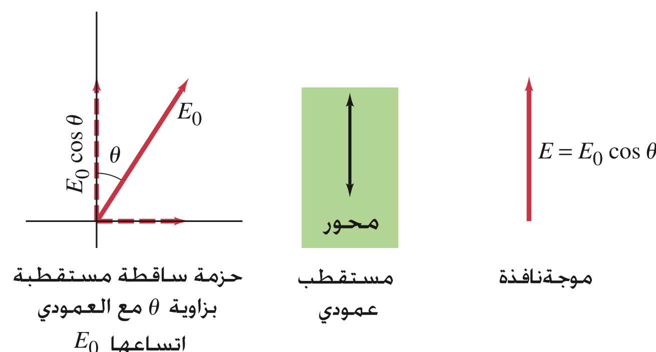
[الامتصاص في المستقطبة يمكن تفسيره على المستوى الجزيئيّ. مجال كهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ يهتزُّ موازيًا للجُزيء الطويل يجعل الإلكترونات تبدأ بالحركة على امتداد الجزيئات، وهكذا يعمل شغلًا عليها وتنقل الطّاقة. وبالتالي، إذا كان $\vec{\mathbf{E}}$ موازيًا للجزيئات فإنّه يُمتص. ولكن المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ العموديّ على الجزيئات الطويلة ليس له هذه الإمكانية لعمل شغل ونقل طاقته، ولذلك، يمرّ بحرية. وعندما نتحدث عن محور النفاذ للمستقطبة، فإنّنا نعني اتجاه المجال $\vec{\mathbf{B}}$ الذي يعبر. لذا، فإنّ محور المستقطبة يكون **عموديًّا** على الجزيئات الطويلة. وإذا أردنا التفكير بوجود شقوق بين الجزيئات الطويلة وِفْقَ (الشّكل 24 – 39)، فإنّ هذا الشّكل ينطبق على المجال في الموجة الكهرومغناطيسيّة (EM)، وليس المجال $\vec{\mathbf{E}}$].

إذا سقطت حزمة من ضوء مستوى الاستقطاب على مستقطبة محور نفاذها يصنع زاوية θ مع اتجاه الاستقطاب للضّوء الساقط، فإنّ الحزمة ستنفذ مستقطبة خطيًّا باتجاه يوازي محور نفاذ المستقطبة، وسيقلّ اتساع E ليصبح $E\cos\theta$. (الشّكل 24 – 41). أي أنّ المستقطبة تمرر فقط مركبة الاستقطاب (يتجه المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$) الموازية لمحور نفاذها. ولأنّ شدة الضّوء تتناسب طرديًّا مع مربّع الاتساع (البندان 11 – 10، و 22 – 5)، فإنّ شدة الضّوء المستقطب في مستوى النافذ من مستقطبة هي

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad \textbf{(5-24)}$$

شدة موجة مستقطبة خطيًّا تنقص بواسطة مستقطبة.

حيث I_0 هي شدّة الحزمة الساقطة، والزاوية θ هي الزاوية بين محور نفاذ المستقطبة ومستوى الاستقطاب للموجة القادمة*.



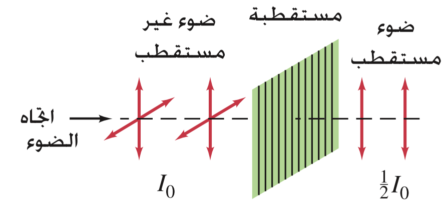
الشّكل 24 – 41 المستقطبة العمودية تنفذ فقط المركبة العمودية للموجة (المجال الكهربائيّ) الساقطة عليها.

يمكن أن تستعمل **المستقطبة** للحصول على ضوء مستوى الاستقطاب من ضوء غير مستقطب؛ لأنّ مركبة الضّوء الموازية للمحور فقط تمرّ عبرها. كما يمكن استعمال المستقطبة **كمحلّلة** لتحديد: (1) ما إذا كان الضّوء مستقطبًا. (2) مستوى الاستقطاب. إنّ المستقطبة التي تعمل محلّلة سوف تمرر المقدار نفسه للضّوء دون الاعتماد على وضع محورها إذا كان الضَّوء غير مستقطب؛ جرّب أن تدير عدسة من نظارات شمسية مستقطبة عند النظر إلى مصباح كهربائيّ. إذا كان الضَّوء مستقطبًا، فعند إدارة المستقطبة، فإنّ الضّوء المار سيكون أكبر ما يمكن عندما يكون مستوى الاستقطاب موازيًا لمحور المستقطبة، ولكنه يكون أقلّ ما يمكن عندما يكون عموديًا عليه. إذا قمت بذلك عند النظر إلى السماء، ويفضل عموديًا على اتجاه الشّمس، فسترى أنّ ضوء السماء مستقطب.
(إنّ ضوء الشّمس المباشر غير مستقطب، ولكن لا تنظر مباشرة إلى الشّمس حتى من خلال المستقطبة، خوفا من أذى سيلحق بها).
إذا نقص الضّوء النافذ من محلّلة إلى الصفر في وضع معين، فسيكون الضّوء مستقطبًا خطيًّا بنسبة 100%. أمّا إذا وصل إلى قيمة دنيا فقط، فإنّ الضّوء **مستقطب جزئيًّا**.

* تُسمّى (المعادلة 24 – 5) عادة **قانون مالوس**، نسبة إلى أتينا مالوس، المعاصر لفرنل.

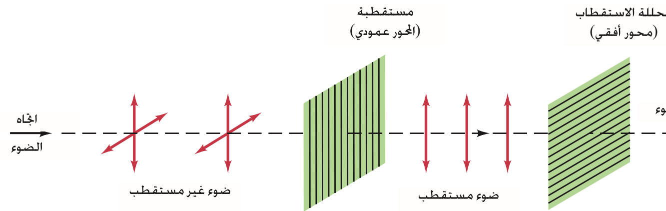
يتكون الضَّوء غير المستقطب من ضوء ذي اتجاهات عشوائية للاستقطاب. كلّ اتجاه من هذه الاستقطابات يمكن تحليله إلى مركبتين متعامدتين في الاتجاه. وبالمتوسط، فإنّ الحزمة غير المستقطبة يمكن اعتبارها مكونة من حزمتين مستويتي الاستقطاب لهما المقدار نفسه ومتعامدتين.

وعند مرور ضوء غير مستقطب في مستقطبة، فإنّ إحدى المركبتين تحذف. لذلك، تنقص شدة الضَّوء النافذ إلى النصف، لأنّ نصف الضَّوء يحذف: $I = \frac{1}{2} I_0$ (الشّكل 24 – 42).



الشّكل 24 – 42 الضَّوء غير المستقطب له مركبتان متساويتا الشدة؛ عمودية وأفقية.بعد المرور بمستقطبة إحدى هاتين المركبتين تحذف. تنقص شدة الضَّوء إلى النصف.

وعندما **تتعامد** مستقطبتان، أي أنّ محوري استقطابهما متعامدان، فإنّ الضَّوء غير المستقطب يتمّ إيقافه بصورةٍ كاملة. كما هو مبيّن في (الشّكل 24 – 43). ويحوّل الضَّوء غير المستقطب إلى ضوء مستقطب خطيًّا بواسطة المستقطبة الأولى.



الشّكل 24 – 43 المستقطبتان المتعامدتان توقفان الضَّوء كليًّا.

المستقطبة الثانية، **المحلّلة**، تحجب هذه المركبة؛ لأنّ محور نفاذها عمودي على الأول. يمكنك تجريب ذلك بعدسات نظارة شمسية مستقطبة (الشّكل 24 – 44). لاحظ أنّ النظارات الشّمسيّة المستقطبة تحجب 50% من الضَّوء غير المستقطب بسبب خاصية الاستقطاب. إنها تمتص أكثر من ذلك لأنّها ملوّنة.



الشّكل 24 – 44. مستقطبات متعامدة. عندما توضع عدستا نظارات شمسية فوق بعضهما، ومحوراهما متعامدان، فلن يمرّ أيّ ضوء تقريبا.

المثال 24-11 مستقطبتان بزاوية °60

يمرّ ضوء غير مستقطب خلال مستقطبتين: محور إحداهما عمودي، ومحور الأخرى عند °60 مع العمودي. صف كلًا من اتجاه الاستقطاب وشدة الضَّوء النافذ.

النّهج: نصف الضَّوء الساقط يمتصّ في المستقطبة الأولى، ويخرج مستقطبًا خطيًّا. وعند مرور الضَّوء في المستقطبة الأخرى، فإنّ الشدة تنقص أكثر وفقًا (للمعادلة 24 – 5). ويصبح مستوى الاستقطاب على امتداد محور المستقطبة الثانية.

الحلّ: تحجب المستقطبة الأولى نصف الضَّوء. لذا، تقلّ الشدة إلى النصف:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

الضَّوء الذي يصل المستقطبة الثانية يكون مستقطبًا عموديًا، وبذلك تقلّ شدته وفقا (للمعادلة 24 – 5) إلى

$$I_2 = I_1 (\cos 60°)^2 = \frac{1}{4} I_1$$

وبذلك $I_2 = \frac{1}{8} I_0$. إنّ الضَّوء النافذ ذو شدّة تعادل ثُمن الشدة الأصلية، وهو مستقطب خطيًّا بزاوية °60 مع العمودي.

المثال المفاهيمي 24-12 ثلاث مستقطبات

رأينا في (الشّكل 24 – 43) أنّه عندما يسقط ضوءٌ غير مُستقطب على مستقطبتين متعامدتين (المحاور بينهما °90)، فإنّ الضَّوء لا يمر خلالهما. ماذا يحدث لو وضعنا بينهما مستقطبة ثالثة بحيث يصنع محورها زاوية °45 مع كلّ من محوري المستقطبتين الأصليتين. (الشّكل 24 – 45أ)؟

الجواب: نبدأ تمامًا كما في (المثال 24 – 11). ونتذكر أنّ الضَّوء المار من كلّ مستقطبة يكون مستقطبًا باتجاه محور نفاذها. وهكذا، فالزاوية في (المعادلة 24 – 5) هي الزاوية بين محوري النفاذ لكلّ زوج من المستقطبات تؤخذ على الترتيب. إنّ المستقطبة الأولى تحوّل الضَّوء إلى مستقطب خطيًّا، وتقلّ شدته من I_0 إلى $I_1 = \frac{1}{2} I_0$. في حين تقلّل المستقطبة الثانية الشدة بـ $(\cos 45°)^2$ (المعادلة 24 – 5):

$$I_2 = I_1 (\cos 45°)^2 = \frac{1}{2} I_1 = \frac{1}{4} I_0$$

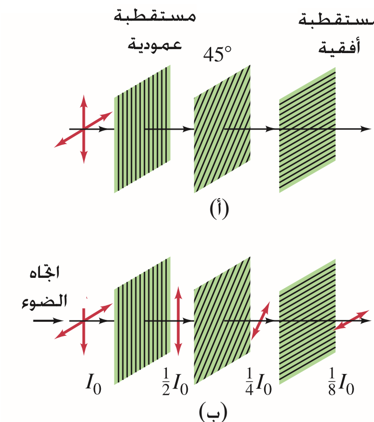
يكون الضَّوء النافذ من الثانية مستقطبًا خطيًّا بزاوية °45 (الشّكل 24 – 45 ب) أمّا المستقطبة الثالثة، فتقلل الشدة إلى

$$I_3 = I_2 (\cos 45°)^2 = \frac{1}{2} I_2$$

إذن، ينفذ ثُمنُ الشدة الأصلية.

ملحوظة: لو لم ندخل المستقطبة الثالثة بزاوية °45، فإنّ شدة تساوي صفرًا سوف تنتج (الشّكل 24 – 43).

الشّكل 24 – 45 (المثال 24 – 12).



التمرين E: كم من الضَّوء سوف يمر لو لم توضع المستقطبة ذات °45 (المثال 24 – 12) بين المستقطبتين، بل (أ) قبل الأولى (العمودية). (ب) بعد المستقطبة الأفقية؟

الاستقطاب بالانعكاس

وهناك طريقةٌ أخرى للحصول على ضوء مستقطب من ضوء غير مستقطب هي الانعكاس. عندما يصطدم الضَّوء بسطح غير فلزي عند أيّ زاوية غير العموديّة، فإنّ الضَّوء المنعكس يكون مستقطبًا في مستوى موازٍ للسطح غالبًا. (الشّكل 24 – 46). أي أنّ المركبة ذات الاستقطاب العموديّ على السطح تنفذ غالبًا أو تمتصّ. ويمكنك اختبار ذلك بإدارة النظارة الشّمسيّة المستقطبة عند النظر من خلالها على سطح مستوٍ لبحيرة أو طريق. وبما أنّ معظم الطرق أفقيّة، فإنّ عدسات النظارات الشّمسية تصنع بحيث يكون محورها عموديًّا لتحجب المركبة الأفقية المنعكسة، وبذلك تقلل الوهج. الناس الذين يذهبون لصيد السمك يضعون النظارات المستقطبة للتخلّص من الوهج المنعكس من سطح البحيرة، أو تيار الماء، وبذلك يرون ما تحت سطح الماء بوضوح أكبر (الشّكل 24 – 47).



الشّكل 24 – 46. الضَّوء المنعكس عن سطح غير فلزي، كسطح الماء المنبسط، يكون مستقطبًا جزئيًّا باتجاه موازٍ للسطح.



(أ) (ب)

الشّكل 24 – 47. صور نهر (أ) يسمح للضَّوء كلّه بدخول عدسة الكاميرا. (ب) باستعمال مستقطبة. تضغط المستقطبة بحيث تمتصّ معظم الضَّوء (المستقطبة) المنعكس عن سطح الماء، ليسمح للضَّوء الخافت من قعر النهر، وأيّ سمكة هناك، لترى بوضوح أكثر.

يعتمد مقدار الاستقطاب في الحزمة المنعكسة على الزاوية، حيث يتغيّر من عدم الاستقطاب للسقوط العموديّ إلى 100% استقطاب عند زاوية تعرف **بزاوية الاستقطاب**،* θ_p. ترتبط هذه الزاوية بمعامل الانكسار للمادتين على جانبي الحدّ الفاصل بالمعادلة

$$\tan\theta_p = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{(24 – 6أ)}$$

حيث n_1 معامل انكسار المادة التي يسير فيها الضَّوء، و n_2 هو معامل انكسار المادة خلف الحدّ الفاصل العاكس. إذا كان الضَّوء يسير في الهواء، $n_1 = 1$، فتصبح المعادلة

$$\tan\theta_p = n \qquad \textbf{(24 – 6ب)}$$

الشّكل 24 – 48. عند θ_p يكون الضَّوء المنعكس مستقطبًا باتجاه موازٍ للسطح، وتكون $\theta_p + \theta_r = 90°$، حيثُ θ_r هي زاوية الانكسار. (النقاط الكبيرة تمثل الاهتزازات العمودية على الصفحة).

تُسَمّى زاويةُ الاستقطاب θ_p أيضًا **زاويةَ بروستر**، و (المعادلة 24 – 6) بمعادلة بروستر، نسبة للفيزيائي الاسكتلندي دافيد بروستر (1781 – 1868)، الذي استنتجها عمليًّا في عام 1812. ويمكن اشتقاق هذه المعادلة من نظرية الموجات الكهرومغناطيسية للضَّوء. ومن المهم أنه عند زاوية بروستر، فإنّ الضَّوءان المنعكس والنافذ (المنكسر) يصفان زاوية 90° بينهما؛ أي أنّ $\theta_p + \theta_r = 90°$، حيث الزاوية θ_r هي زاوية الانكسار. (الشّكل 24 – 48). ويمكن رؤية ذلك إذا عوّضنا (المعادلة 24 – 6أ)

$$n_2 = n_1 \tan\theta_p = n_1 \sin\theta_p / \cos\theta_p$$

في قانون سنيل

$$n_1 \sin\theta_p = n_2 \sin\theta_r$$

لنحصل على $\sin\theta_r = \cos\theta_p$ والذي ينطبق فقط إذا كانت $\theta_p = 90° - \theta_r$

المثال 24-13 زاوية الاستقطاب

(أ) عند أيّ زاوية سقوط ينعكس ضوء الشّمس من سطح بحيرة مستقطبًا؟ (ب) ماذا تساوي زاوية الانكسار؟

النّهج: زاوية الاستقطاب على السطح هي زاوية بروستر. (المعادلة 24 – 6 ب). ونجد زاوية الانكسار من قانون سنيل.

الحلّ: (أ) نستعمل (المعادلة 24 – 6 ب) علمًا أنّ $n = 1.33$، لذلك $\tan\theta_p = 1.33$ تعطينا $\theta_p = 53.1°$.

(ب) من قانون سنيل، $\sin\theta_r = \sin\theta_p / n = \sin 53.1° / 1.33 = 0.601$ لتعطي $\theta_r = 36.9°$

ملحوظة: $\theta_p + \theta_r = 53.1° + 36.9° = 90.0°$، كما هو متوقع.

* هناك جزء فقط من الضَّوء الساقط ينعكس على سطح المادة الشفافة رغم أنّ هذا الضَّوء مستقطب 100% (إذا كانت $\theta = \theta_p$). أمّا باقي الضَّوء، والذي ينفذ إلى الوسط الجديد فيكون مستقطبًا جزئيًّا فقط.

* 11-24 شاشات عرض البلّورات السّائلة (LCD)

استعمال رائع للاستقطاب هو **شاشات عرض البلورات السّائلة** (LCD). تستعمل LCD شاشة عرض في الحاسبات اليدوية، وساعات المِعْصَم (اليد) الرقمية، والهواتف المحمولة، وفي الشاشات الملونة في الحاسوب وشاشات التلفزيون.

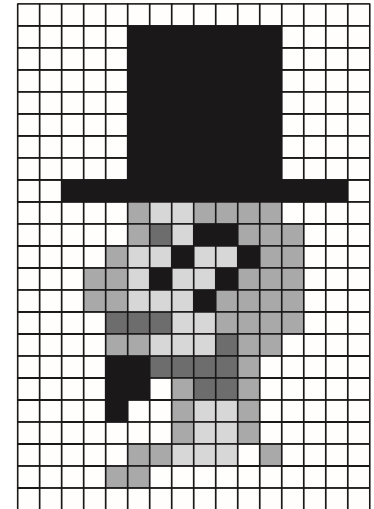
إنّ شاشةَ عرض البلورة السائلة مصنوعةٌ من عددٍ كبيرٍ من المستطيلات الصغيرة المسماة "عناصر الصورة" بيكسل. تعتمد الصورة التي تراها على أيّ هذه العناصر معتمة أو مضيئة، وبأيّ لون، كما هو مقترح في (الشّكل 24 – 49) لصورة بسيطة بالأسود والأبيض.

البلورات السائلة هي مواد عضوية تكون عند درجة حرارة الغرفة في طور ليس بالصلب التام ولا بالسائل التام. إنّها نوع من الهلام وجزيئاتها تظهر عشوائية في التوزيع، وهي خاصية في السوائل، كما ناقشنا في (البند 13 – 1)، و(الشّكل 13 – 2). كما أنها تعطي خاصية الاصطفاف كبلورة صلبة (الشّكل 13 – 2أ)، ولكن في بعد واحد. إنّ البلورات السائلة التي نجدها مفيدة مكونة من جزيئات صلبة تشبه القضبان، تتفاعل مع بعضها بصورة ضعيفة، وتترتب موازية لبعضها، كما في (الشّكل 24 – 50).

في شاشة البلورات السائلة (LCD) البسيطة، يحتوي كلُّ عنصر صورةٍ بلورةً سائلةً بين صفيحتين زجاجيتين سطوحها الداخلية تفرك لتكوين خدوش متوازية عرضها في نطاق النانومتر. وتترتّب جزيئات البلورة السائلة الشبيهة بالقضبان والمتصلة بالخدوش على امتداد هذه الخدوش. الصفيحتان عادة تحتويان على خدوش بينها زاوية 90°، والقوى الضعيفة بين هذه الجزيئات تؤدي للحفاظ عليها ممتدة مع أقرب جيرانها، لتنتج ذلك النمط الملتوي والمبين في (الشّكل 24 – 51أ).

تحتوي كلّ من السّطوح الخارجية للصفائح الزجاجية على غشاء رقيق مستقطب، وهي كذلك مرتبة لتصنع 90° مع بعضها. ويصبح الضّوء غير المستقطب الساقط من اليسار مستقطبًا خطيًّا، وتحافظ جزيئات البلورة السائلة على هذا الاستقطاب على امتداد شكل القضبان. أي أنّ مستوى استقطاب الضّوء يدور مع الجزيئات عند مرور الضّوء خلال البلورة السائلة. وهكذا يخرج الضّوء ومستوى استقطابه، وقد دار بزاوية 90°، وتمر من المستقطب الثاني بسهولة. وهنا عنصر الصورة الدقيقة (LCD) يظهر مضيئًا (لامعًا).

والآن، افرض أنّ جهدًا تم التأثير به في الأقطاب الشفافة على كلّ صفيحة من عنصر الصورة. الجزيئات شبيهة القضبان مقطعة (أو يمكن أن تكتسب فصلًا داخليًّا للشحنات بتأثير المجال الكهربائي المؤثر). يعمل الجهد المؤثر على ترتيب الجزيئات، وبذلك لا تتبع النمط الملتوي المبين في (الشّكل 24 – 51أ)، بحيث تمتد الجزيئات النهائية دائمًا في مستوى موازٍ للصّفائح الزّجاجية. يؤدي المجال الكهربائي المؤثر إلى ترتيب الجزيئات منبسطة، يسار – يمين (عمودية على الصفائح الزجاجية). ولا تؤثر في استقطاب الضّوء بصورة قويّة. إنّ الضّوء الداخل والمستقطب خطيًّا لا يتم إدارة مستوى استقطابه عند المرور، ولا ينفذ الضّوء من المستقطب الثاني (الأفقي). وهكذا، يبدو عنصر الصورة معتمًا بوجود الجهد المؤثر*.



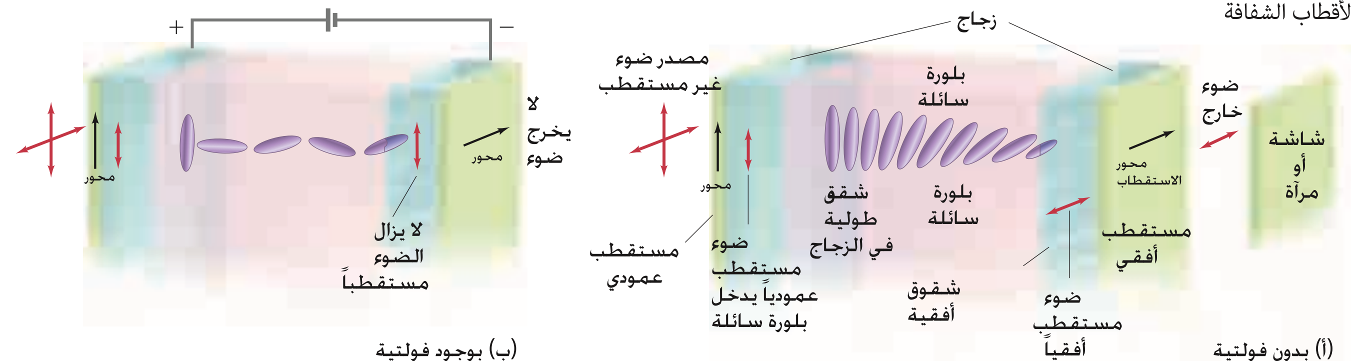
الشّكل 24 – 49. مثال على خيال مكوّن من عدد كبير من المربعات الصغيرة أو البيكسل (عناصر الصورة). قوة التّفريق في هذا الصورة ضعيفة.



الشّكل 24 – 50. تترتب جزيئات البلورة السائلة في بعد واحد (متوازية) ولكن لها مواقع عشوائية (يمين – يسار، أعلى – أسفل.)

الشّكل 24 – 51 (أ) الشّكل "الملتوي" للبلورات السائلة. يدور مستوى استقطاب الضّوء 90°. هناك خطٌ واحد من الجزيئات واضح. (ب) جزيئات اتجاهاتها مشوهة نتيجة المجال الكهربائيّ. مستوى الاستقطاب لا يتغير، لذلك لا يمر الضّوء خلال المستقطب الأفقيّ. (الأقطاب الشفافة ليست مبينة).

* في بعض شاشات العرض، تكون المستقطبات متوازية (تبقى الخدوش متعامدة لتبقي على اللّي أو الثني). عندها، وفي غياب الجهد ينتج عتمة (لا ضوء) وبوجود الجهد ينتج ضوء لامع.

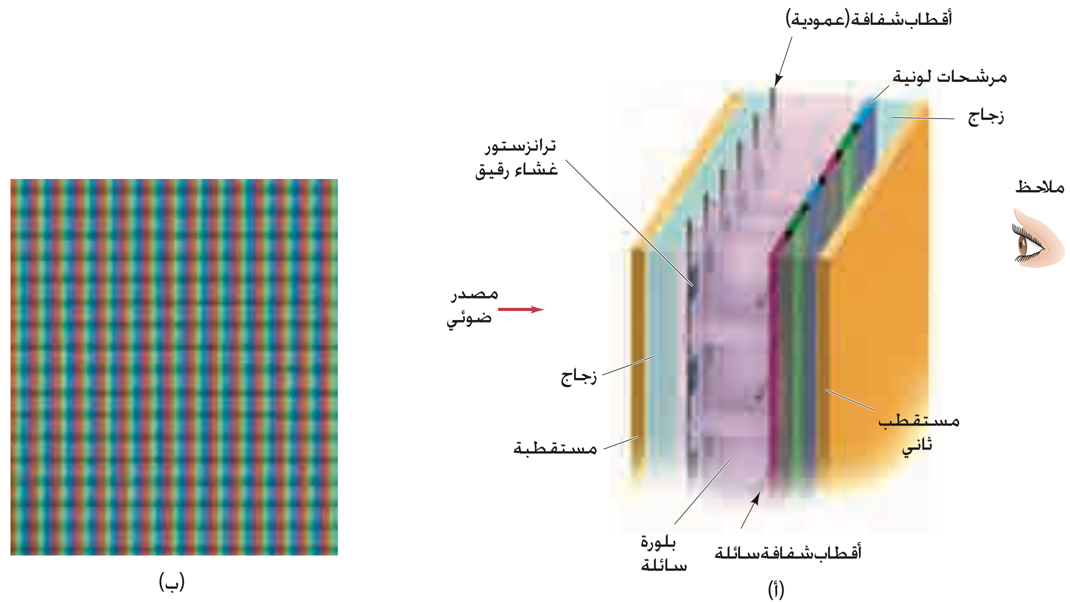


تُستعمل شاشاتُ العرض البسيطة للساعات والحاسبات الضَّوءَ المتاح كمصدر (لا تستطيع أن ترى العرض في الليل). وهناك مرآة خلف LCD تعكس الضَّوء نحو الخلف. كما أنّ هناك عددًا قليلًا من عناصر الصورة. تعود إلى الأجزاء الممتدة التي يحتاج إليها لتشكّل الأعداد من 0 إلى 9 (وأحيانًا الحروف في بعض الشاشات). كما هو مبين في (الشّكل 24 – 52). أيّ عناصر صورة تؤثر عليها بالجهد تبدو داكنة. وتشكل جزءًا من العدد. ودون هذا الجهد، تقوم العناصر بتحرير الضَّوء خلال المستقطبات إلى المرآة ونحو الخلف. والتي تشكل خلفية إلى الأرقام على الشاشة.

التلفزيون الملون وشاشات الحاسوب معقدة أكثر. يتكوّن عنصر الصورة من ثلاث خلايا. أو دون العنصر. كلّ منها مغطى بمرشح ضوئيّ أحمر. أو أخضر. أو أزرق. إنّ تغيير لمعان هذه الألوان الثلاثة الأساسية يمكن أن ينتج أيّ لون طبيعيّ. تتكوّن الشاشةُ ذات النوعية الجيدة من مليون عنصر صورة أو أكثر. مثل سطح أنبوب أشعة المهبط الملون (CRT) (الشّكل 17 – 20). وخلف هذا الترتيب من عناصر الصورة مصدرٌ ضوئيٌّ. هي أنابيب وميضة رفيعة عادة مثل قطر القشة. يمر الضَّوء خلال عناصر الصورة كما في (الشّكلين24 – 51أ. و ب). انظر (الشّكل 24 – 53).



الشّكل 24 – 52. شاشة حاسبة LCD الأجزاء السوداء أو عناصر الصورة يؤثر فيها جهد. لاحظ أنّ رقم 8 يستخدم العناصر السبعة كلّها. أمّا الأرقام الأخرى فتستخدم أقلّ من ذلك.

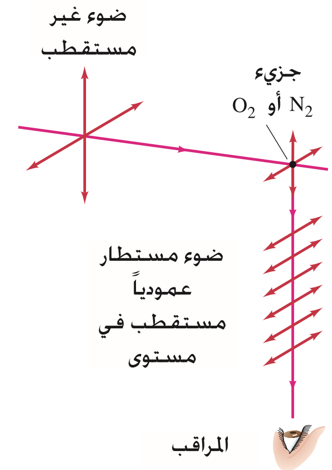


الشّكل 24 – 53 التركيب الأساسي لـشاشة LCD حاسب أو تلفزيون. كلّ عنصر صورة يستخدم ثلاث خلايا (دون عنصر صورة)، كلّ منها مزود بمرشح أحمر، أو أخضر، أو أزرق. شاشة عرض فاعلة لها ترانزستورات أغشية رقيقة بل وأكثر تعقيدًا.

في شاشة عرض LCD **غير فاعلة المصفوفة**. هناك مجموعة من الأقطاب العمودية والأفقية تحمل إشارات كهربائية إلى عناصر الصورة: سلكان. واحد من كلّ مجموعة. "يتقاطعان" عند كلّ "دون العنصر". وتوقيت إلكتروني دقيق (يدعى "عنونة"). وتحوّل الجهد هناك تشغيل – إطفاء (on - off). يمكن أن تؤثر الإشارات في دون العناصر القريبة لتقلل التباين ونوعية الصورة. ويمكن الحصول على صور أفضل **بمصفوفة فاعلة** من LCD والتي لها ترانزستور الغشاء الرقيق (TFT) عند كلّ دون عنصر للتحكم بإضاءتها بدقة.

وللحصول على مدى رماديّ أو مدى من وضوح اللون. لا يستطيع كلُّ دون عنصر أن يتحول ببساطة من تشغيل إلى إطفاء كما في (الشّكل 24 – 51). وتستعمل عدة تقنيات تعتمد على تركيب الـ LCD. إذا كان الجهد في (الشّكل 24 – 51 ب) صغيرًا بصورة كافية. فإنّ عدم ترتيب الجزيئات يكون صغيرًا. ممّا يسمح بدوران متجه الاستقطاب. وهذا يسمح لبعض الضَّوء بالمرور. فالمقدار الحقيقي يعتمد على الجهد. تبادليًا. كلُّ دون عنصر يمكن إعطاؤه نبضة – طول الوقت الذي تكون فيه تشغيل (*on*) يؤثر في السّطوع الناتج. ويمكن الحصول على أثر شدة السّطوع أو ضعفه بواسطة عدد دون العناصر المجاورة ذات اللون نفسه. والتي تكون في حالة تشغيل أو إطفاء؛ هذا النوع يسمح للعين "أخذ المتوسط" لكثير من دون العنصر. ولكن هذا يقلل الحدّة. أو قدرة التّفريق للصورة.

* 24-12 تشتت الضَّوء بواسطة الجو



ينفذ ضوء الشمس غير المستقطب من جزيئات الهواء، ويرى المراقب من زاوية قائمة أن الضوء المستقطب في المستوى لا يكون له مركبة اهتزاز على امتداد خط الاهتزاز.

إنّ احمرار الغروب، وزرقة السماء، واستطارة الضَّوء في السماء (جزئيًّا على الأقل) ظواهر يمكن تفسيرها على أساس استطارة الضَّوء بواسطة جزيئات الغلاف الجوّيّ. في (الشّكل 24 – 54) نرى الضَّوء غير المستقطب من الشّمس يسقط على جزيءٍ من الغلاف الجوّيّ الأرضي. المجال الكهربائي في الموجة الكهرومغناطيسية (EM) تجعل الشحنات الكهربائية في الجزيء تبدأ بالحركة، ويمتص الجزيء بعض طاقة الإشعاع الساقط. لكنّه يعيد إشعاع هذا الضَّوء لأنّ الشحنات في حالة اهتزاز. وكما ناقشنا في (البند 22 – 2)، فإنّ الشحنات المهتزة تنتج موجات كهرومغناطيسية. وتكون الشدة عظمى على امتداد خطّ عمودي على الاهتزاز، وتنخفض إلى الصفر على امتداد خط الاهتزاز (البند 22 – 2). في (الشّكل 24 – 54)، تحلل حركة الشحنات إلى مركبتين. إنّ المشاهد باتجاه عمودي على اتجاه ضوء الشّمس، كما هو مبين، سوف يرى ضوءًا مستقطبًا خطيًّا؛ بسبب عدم وجود ضوء يُشَعُّ على امتداد الخطّ للمركبة الثانية للاهتزاز. (عند النظر على امتداد خط الاهتزاز، لا ترى ذلك الاهتزاز، ولذلك لا ترى الموجات التي يولدها.) وعند زوايا نظر أخرى، ستكون المركبتان موجودتين؛ إلا أن إحداهما ستكون أقوى على أيّ حال. لذا، فإنّ الضَّوء يبدو مستقطبًا جزئيًّا. وهكذا، فعملية الاستطارة تفسر استقطاب ضوء السماء.

إنّ استطارة الضَّوء بواسطة جو الأرض يعتمد على λ. وبالنسبة إلى جُسيماتٍ أصغر بكثيرٍ من طول موجة الضَّوء (كجزيئات الهواء)، سوف تشكّل هذه الجُسيمات حواجز أقلّ بالنسبة إلى الأمواج الطويلة منها في الأمواج القصيرة. تقلّ الاستطارة، في الحقيقة، مع $1/\lambda^4$. وهكذا، فإنّ الضَّوءين الأزرق والبنفسجيّ يستطيران أكبر بكثير من الأحمر والبرتقالي، ولذلك تبدو السماء زرقاء. وعند الغروب، تقطع أشعة الشّمس مسارًا أكبر عبر الجوّ. ولهذا، فإنّ كثيرًا من الضَّوء الأزرق يكون قد فقد بسبب الاستطارة. فالضَّوء الذي يصل سطح الأرض وينعكس عن الغيوم والضباب يفتقر للضَّوء الأزرق. ولهذا يبدو الغروب محمرًّا.

تطبيق الفيزياء
لماذا يكون لون السماء أزرق.
لماذا يكون لون الغروب أحمر.

ينطبق اعتماد الاستطارة على $1/\lambda^4$ فقط إذا كانت الأجسام المسببة للاستطارة أصغر بكثير من طول موجة الضَّوء. وهذا ينطبق على جزيئات الأكسجين والنيتروجين والتي أقطارها نحو 0.2 nm. أمّا الغيوم فتحتوي على رذاذ الماء أو البلورات، وهي أكبر بكثير من λ. فهي تعمل على استطارة ترددات الضَّوء كلّها بالنسبة ذاتها تقريبًا. لذا، تبدو الغيوم بيضاء (أو رمادية، إذا وقعت في الظل).

ملخص

لقد دعمت المشاهدات بقوّة أنّ الضَّوء يظهر **التّداخل والحيود**: النّظريّة الموجيّة للضَّوء. وتفسّر النّظريّة الموجيّة كذلك الانكسار وحقيقة أنّ الضَّوء يسير ببطء في المواد الصلبة الشفافة والسائلة ممّا هو عليه في الهواء.

ولقد ساعد **مبدأ هويغنز** على التنبؤ بالنّظريّة الموجيّة، وهذا المبدأ ينصّ على أنّ كلّ نقطة على مقدمة الموجة يمكن اعتبارها مصدرًا للمويجات التي تنتشر نحو الأمام بسرعة الموجة نفسها.

إنّ طول موجة الضَّوء في وسط معامل انكساره n هو

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \qquad (1 - 24)$$

حيث λ طول الموجة في الفراغ، أمّا التردد فلا يتغير.

لقد عرضت تجربة شقي يانغ بوضوح تداخل الضَّوء. كما تمّ تفسير الهدب المضيئة على أساس التّداخل البناء بين حزمتين قادمتين من الشّقّين، حيث فرق المسار الضوئي هو عدد صحيح من الطّول الموجيّ. وأنّ المناطق المعتمة بينهما تعزى إلى التداخل الهدام حيث يختلف المسار الضوئي بـ $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda$ وهكذا.

الزوايا θ التي يحدث عندها **التّداخل البناء** تعطى بـ

$$\sin\theta = m\frac{\lambda}{d} \qquad (2 - 24أ)$$

حيث λ طول موجة الضَّوء، وd البعد بين الشّقّين، أما m فهو عدد صحيح $(0, 1, 2, \cdots)$. **التّداخل الهدام** ينتج عند زوايا θ حيث

$$\sin\theta = \left(m + \tfrac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} \qquad (2 - 24ب)$$

حيث m عدد صحيح $(0, 1, 2, \cdots)$.

مصدران ضوئيان يكونان مترابطين تمامًا إذا كانت الموجات الصادرة عنهما لها التردد نفسه، وتبقيان على الطور ذاته بينهما في الأوقات جميعها. وإذا كان للموجات الصادرة عنهما علاقة طور عشوائية طوال الوقت (كما في مصباحين ضوئيين متوهجين) فإنّ المصدرين يكونان **غير مترابطين**.

تردد أو طول موجة الضَّوء يحدد لونه. يمتد **الطّيف المرئيّ** من نحو 400 nm (بنفسجي) إلى نحو 750 nm (أحمر).

تحلل المناشير الزجاجية الضَّوء الأبيض إلى مركباته اللونية؛ لأنّ معامل الانكسار يتغير مع طول الموجة، وهذه الظاهرة تعرف **بالتّفريق اللوني**، والذي له عدة تطبيقات عملية، كطلاء العدسات وحلقات نيوتن.

وتنطبق الصيغة الرياضية $\sin\theta = m\lambda/d$ للتداخل البناء أيضًا على **محززة الحيود** التي تتكون من شقوق كثيرة متوازية، يفصل بينها مسافة d. وتكون قمم التّداخل البناء أكثر لمعانًا وحدّة في محززة الحيود مما هي عليه في تجربة شقّيّ يانغ.

تستعمل محززة الحيود (أو المنشور) في **جهاز التحليل الطّيفي** لفصل الألوان المختلفة، أو لملاحظة **الأطياف الخطية**؛ ولرتبة معينة m، فإنّ θ تعتمد على λ. إنّ التحديد الدقيق لطول الموجة يمكن إجراؤه بجهاز التحليل الطّيفي بقياس الزاوية θ بدقة كبيرة.

يعود **الحيود** لحقيقة أنّ الضَّوء، كباقي الموجات، ينحني حول الأجسام التي يمرّ بها، وينتشر بعد مروره في الشّقّوق الضيقة. هذا الانحناء يعطي نمط الحيود الذي يعود إلى التّداخل بين الأشعة الضوئية التي تسير مسافات مختلفة.

إنّ الضَّوء الذي يمر خلال فتحة ضيقة عرضها D (في حدود طول الموجة) سوف ينتج نمطًا بمركز لامع نصف عرضه θ يعطي بالعلاقة

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D} \qquad (3 - 24أ)$$

ويحاط بخطوط خافتة على الجانبين.

الضَّوء المنعكس من السطحين الأمامي والخلفي لغشاء رقيق من مادة شفافة يمكن أن يتداخل. وينتج الاختلاف في الطور بـ $180°$ $(\frac{1}{2}\lambda)$ عندما ينعكس الضَّوء على سطح حيث يزداد معامل الانكسار. تداخل الغشاء الرقيق في **الضَّوء غير المستقطب**، تهتز متجهة المجال الكهربائيّ في الاتجاهات العرضية جميعها. إذا اهتز المجال الكهربائيّ فقط في مستوى معين، فيقال إنّ الضَّوء **مستوي الاستقطاب**. كما يمكن أن يكون الضَّوء أيضًا جزئيّ الاستقطاب.

عندما يمرّ شعاع من ضوء غير مستقطب خلال صفيحة **مستقطبة**، يكون الضَّوء الخارج مستقطبًا خطيًا. وعندما تكون حزمة ضوئية مستقطَبة، وتمر خلال مستقطِبة فإنّ شدة الضَّوء تتغير عند إدارة المستقطِبة. وهكذا تتصرف الصفيحة **كمستقطِبة أو محلّلة**.

إنّ شدة ضوء حزمة مستقطَبة خطيًا تسقط على مستقطِبة تقل بالمعامل

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad (5\text{-}24)$$

حيث θ هي الزاوية بين محور المستقطبة ومستوى الاستقطاب الابتدائي.

يمكن أن يكون الاستقطاب كليًا أو جزئيًا **بواسطة الانعكاس**. إذا انعكس الضَّوء الذي ينتقل في الهواء، عن سطح معامل انكسار مادته n، فسيكون الضَّوء المنعكس مستقطبًا كليًّا إذا كانت زاوية السقوط تعطي بالعلاقة

$$\tan\theta_p = n \qquad (6 - 24أ)$$

وحقيقة أنّ الضَّوء يمكن استقطابه، تبيّن أنّ الضَّوءَ موجةٌ عرضية.

أسئلـــة

1. هل ينطبق مبدأ هويغنز على موجات كلّ من الصّوت والماء؟ فسّر ذلك.

2. ما الدليل على أنّ الضَّوءَ نوعٌ من الطّاقة؟

3. لماذا يوصف الضَّوء أحيانًا بأنّه أشعة، وأحيانًا أخرى بأنّه موجات؟

4. نستطيع سماع الأصوات حول الزوايا، لكننا لا نرى حول الزوايا؛ رغم أنّ كلا من الصّوت والضَّوء موجات. فسّر الفرق بينهما.

5. لو غمرت تجربة شقي يانغ في الماء، فكيف سيتغير نمط الهدب؟

6. أُسقط ضوء أحمر وحيد اللون على شقين، ولوحظ نمط التّداخل على شاشة على بعد معين. فسّر كيف سيتغير نمط التّداخل لو استبدل مصدر أزرق للضَّوء بدلا من المصدر الأحمر.

7. شعاعان ضوئيان من المصدر نفسه يتداخلان تداخلا هدامًا إذا اختلف مسارهما، ما مقدار هذا الاختلاف؟

8. لماذا كانت مشاهدة تداخل الشّقّين دليلا على النّظريّة الموجيّة للضَّوء أكثر من مشاهدة الحيود؟

9. قارن بين تجربة الشّقّين لموجات كلّ من الصّوت الضَّوء. ناقش أوجه الشبه والاختلاف.

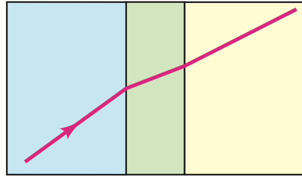
10. لماذا لا ينتج الضَّوء من مصباحي السيارة نمط تداخل؟

11. افرض أنّ ضوءًا أبيض يسقط على الشّقّين في (الشّكل 24 – 7)، لكن إحدى الفتحتين تغطى بمرشح أحمر (700 nm) والأخرى بمرشح أزرق (450 nm). صف النمط على الشاشة.

12. عند مرور ضوء أبيض في صفحة زجاج النافذة، فإنّه لا يتوزع إلى ألوان كما في المنشور. فسّر السبب.

13. لنوعي العدسات المفرقة والمجمعة، ناقش كيف يختلف البعد البؤري للضَّوء الأحمر عنه للضَّوء البنفسجيّ.

14. شعاع ضوئيّ ينكسر خلال ثلاث مواد مختلفة (الشّكل 24 – 55). رتّب هذه المواد حسب معامل انكسارها، من الأقل إلى الأكثر.



الشّكل 24 – 55. (السؤال 14)

15. ضع يدك أمام عينيك، وركز على مصدر ضوئي بعيد خلال فتحة ضيقة بين إصبعين. (اضبط إصبعيك للحصول على أفضل نمط) صف النمط الذي تشاهده.

16. ماذا يحدث لنمط الحيود لشق منفرد إذا غُمر الجهازُ كلُّه: (أ) في الماء؟ (ب) في الفراغ بدلا من الهواء؟

17. للحيود في شق منفرد، ما أثر زيادة: (أ) عرض الشّقّ؟ (ب) طول الموجة؟

18. ما الفرق بين نمطي التّداخل الناتجين من: (أ) فتحتين البعد بينهما 10^{-4} cm (ب) محززة حيود تحتوي على 10^4 lines/cm ؟

19. في محززة الحيود، ما فائدة: (أ) الشّقّوق الكثيرة؟ (ب) الحزوز المتقاربة؟

20. يسقط ضوء أبيض على (أ) محززة حيود، (ب) منشور. يتكون قوس المطر على جدار مباشرة تحت الشّعاع الأفقي الساقط في كلّ حالة. ما لون أعلى القوس في كلّ حالة؟ فسّر ذلك.

21. يتكون ضوء من أطوال موجية بين 400 nm و 700 nm، يسقط عموديًّا على محززة حيود. لأيّ الرتب سيكون هناك (إذا وجد) تطابق في الطّيف المنظور؟

22. لماذا تشاهد هدب التّداخل فقط في غشاء **رقيق** مثل فقاعة الصابون، وليس لقطعة سميكة من الزجاج، مثلاً؟

23. إذا أمسكنا بقرص مُدمَج (CD) بزاوية في الضّوء الأبيض، فإنّ الضّوء المنعكس يكون طيفًا كاملا (الشّكل 24 – 56). فسّر ذلك. ماذا تتوقع أن ترى لو أنّ ضوءًا وحيد اللون استعمل بدلا من ذلك؟



الشّكل 24 – 56 (السؤال 23)

24. لماذا تكون حلقات نيوتن (الشّكل 24 – 31) متراصّةً أكثر كلّما ابتعدنا عن المركز؟

25. تبدو بعض العدسات المطليّة صفراء مخضرّةً عندما نراها بالضّوء المنعكس. ما الأطوال الموجيّة التي تتوقع أنّ الطّلاء مصمّمٌ لينفذها بصورةٍ تامة؟

26. تبدو بقعة زيت على بركة مضيئة عند الحواف، حيث سمكها أقلّ بكثيرٍ من طول موجات الضّوء المرئيّ. ماذا يمكنك القول عن معامل انكسار الزيت؟

27. ماذا يخبرنا استقطاب الضّوء عن طبيعته؟

28. فسّر ميزة النظارات الشّمسية المستقطبة مقارنة مع النظارات المطليّة بالقصدير العادية؟

29. متى تقول إنّ النظارات مستقطبة أو غير مستقطبة؟

30. صفيحتان مستقطبتان بينهما زاوية $90°$ لا تسمحان لمرور ضوء خلالهما. لكن ثلاث صفائح مستقطبة بين كلّ منها زاوية $45°$ سوف تسمح ببعض الضّوء. ماذا سيحدث لضوء غير مستقطب لو رتبت أربع صفائح كلّ منها تختلف بزاوية $30°$ عن التي أمامها؟

* 31. ماذا سيكون لون السماء لو كانت الأرض دون غلاف جوّيّ؟

* 32. لو كانت كثافة الغلاف الجويّ للأرض أكثر بـ 50 مرة مما هي عليه، فهل سيبقى ضوء الشّمس أبيض؟ أم هل سيكون له لون آخر؟

مسائل

24 – 3 تداخل الشّقّين

1. (I) يسقط ضوء وحيد اللون على شقين البعد بينهما 0.016 mm. وينتج الهدبة الخامسة عند زاوية $8.8°$. ما طول موجة الضّوء المستعمل؟

2. (I) لوحظ أنّ الهدبة الثالثة لضوء 610 nm عند زاوية $18°$ عند سقوط الضّوء على شقين ضيقين. ما البعد بين الشّقّين؟

3. (II) ضوء وحيد اللون يسقط على شقين ضيقين البعد بينهما 0.048 mm الهدب المتتابعة على شاشة تبعد 5.00 m تبعد عن بعضها 6.5 cm قرب مركز النمط. جد طول الموجة والتردد للضّوء المستعمل.

4. (II) ضوء متوازٍ من $He-Ne$ ليزر، طول موجته 656 nm، يسقط على شقين ضيقين جدًّا، البعد بينهما 0.060 mm. كم تتباعد الهدب عند مركز النمط على شاشة تبعد 3.6 m من الشّقّين؟

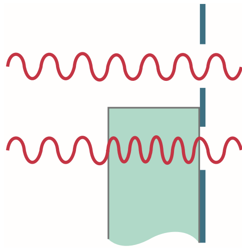
5. (II) يسقط ضوء طول موجته 680 nm على شقين، وينتج نمط تداخل فيه الهدبة ذات الرتبة الرابعة تبعد 38 mm من الهدبة المركزية على شاشة تبعد 2.0 m. فما البعد بين الشّقّين؟

6. (II) تعبر الموجتان 720 nm، و 660 nm من شقين البعد بينهما 0.58 mm، ما البعد بين الهدب ذات الرتبة الثانية لكلّ من الموجتين على شاشة تبعد 1.0 m عن الشّقّين؟

7. (II) في تجربة الشّقّين، وجد أنّ الضّوء الأزرق ذا طول الموجة 460 nm يعطي هدبة لامعة ذات الرتبة الثانية عند مكان معين على الشاشة. ما طول موجة الضّوء المرئيّ الذي سيكون له هدبة معتمة في المكان نفسه؟

8. (II) موجتا ماء، قمتاهما متوازيتان، وتبعدان 2.5 cm تمران خلال فتحتين البعد بينهما 5.0 cm في لوحة عند نقطة على بعد 2.0 m من اللوحة، عند أيّ زاوية بالنسبة لخط مستقيم خلال الفتحة ستكون هناك حركة موجية ضعيفة أو انعدام للحركة الموجيّة؟

9. (II) افرض أنّ قطعة رقيقة من الزجاج وضعت أمام الفتحة السفلية في (الشّكل 24 – 7) بحيث إنّ الموجتين تدخلان الشّقّين بفارق في الطور مقداره $180°$ (الشّكل 24 – 57). صف بالتفصيل نمط التّداخل على الشاشة.



الشّكل 24 – 57 (سؤال 9)

10. (II) في تجربة الشّقّين، الهدبة اللامعة الثالثة لضوء طول موجته 500 nm تقع على بعد 12 mm من الهدبة المركزية اللامعة على شاشة تبعد 1.6 m من الشّقّين. فإذا أسقط ضوء طول موجته 650 nm بعد ذلك على الشّقّين، فعلى أيّ بُعد من الهدبة المركزية ستقع الهدبة المضيئة الثانية؟

11. (II) شقان ضيقان البُعد بينهما 1.0 mm أسقط عليهما ضوء طول موجته 544 nm. جد المسافة بين الهدب المتجاورة على شاشة تبعد 5.0 m من الشّقّين.

12. (III) ضوء طول موجته 480 nm في الهواء يسقط على شقين البعد بينهم 6.00×10^{-2} mm. غمر الشّقّان في الماء، إضافة لشاشة عرض تبعد 40.0 cm. ما المسافة بين الهدب على الشاشة؟

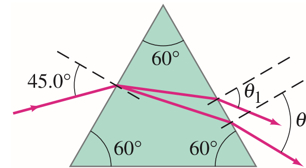
13. (III). صفيحة رقيقة جدًّا من البلاستيك $(n = 1.60)$ تغطي إحدى الشّقّين في تجربة الشّقّ المزدوج، وأضيئت بضوء طول موجته 640 nm. وكانت النّقطة المركزية على الشاشة معتمة بدل أن تكون لامعة. ما أقلّ سمك للبلاستك؟

24 – 4 التّفريق اللونيّ

14. (I) بأيّ نسبة مئوية، تزيد سرعة الضّوء الأحمر (700 nm) على سرعة الضّوء البنفسجيّ (400 nm) في زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) أو الصّوان؟ (انظر الشّكل 24 – 14)؟

15. (II) شعاع ضوئي يسقط على قطعة زجاج بزاوية سقوط $60.00°$ يحتوي الموجتين 450.0 nm، و 700.0 nm اللتين معامل انكسار الزجاج لهما 1.4820، و 1.4742 على الترتيب. ما الزاوية بين الشّعاعين المنكسرين؟

16. (III) حزمةٌ ضوئيّةٌ متوازيةٌ تحتوي الموجتين $\lambda_1 = 450\,\text{nm}$، و $\lambda_2 = 650\,\text{nm}$. تدخل زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) الصوّان أو لمنشور متساوي الأضلاع مبيّن في (الشّكل 24 – 58). عند أيّ زاوية يخرج كلّ شعاع من المنشور؟ (اعط قيمة الزاوية بالنسبة للعمودي على وجه المنشور).



الشّكل 24 – 58
(المسألتان 16، و 87)

24 – 5 حيود الشّقّ المنفرد

17. (I) إذا سقط ضوء طول موجته 580 nm على شق عرضه 0.0440 mm. فما العرض الزاوي الكامل للهدبة المركزية للحيود؟

18. (I) ضوء وحيد اللون يسقط على شق عرضه $2.60 \times 10^{-3}\,\text{mm}$. إذا كانت الزاوية بين الهدبتين المعتمتين من الرتبة الأولى على جانبي الهدبة المركزية هي $35.0°$ (من الهدبة المعتمة للهدبة المعتمة). فما طول موجة الضّوء المستعمل؟

19. (II) ضوء طول موجته 520 nm. يسقط على شق منفرد عرضه $3.20 \times 10^{-3}\,\text{mm}$. احسب بُعد أوّل هدبة حيود لامعة عن الهدبة المركزية إذا كان بعد الشاشة $10.0\,\text{m}$.

20. (II) شقٌّ منفردٌ عرضُهُ 1.0 mm. أضيء بضوء طول موجته 450 nm. ما عرض الهدبة المركزية (بـ cm) في نمط الحيود على شاشة تبعد 5.0 m؟

21. (II) ضوء وحيد اللون طول موجته 653 nm يسقط على شق منفرد. إذا كانت الزاوية بين أول هدبتين لامعتين على جانبي الهدبة المركزية هو $32°$. فاحسب عرض الشّقّ؟

22. (II) ما عرض الهدبة المركزية للحيود على شاشة تبعد 2.30 m خلف شقٍّ منفرد عرضه 0.0348 mm ويضاء بموجة 589 nm؟

23. (II) عندما يسقط ضوء أزرق طول موجته 440 nm على شقٍّ منفرد. فإنّ أوّلَ هدبتين معتمتين على جانبي الهدبة المركزية تبعدان بزاوية $55.0°$ عن بعضهما. حدّد عرض الفتحة.

24. (II) عندما يسقط ضوء بنفسجي طول موجته 415 nm على شق منفرد. فإنّه ينتج هدبة مركزية من الحيود عرضها 9.20 cm على شاشة بعدها 2.55 m. فما عرض الفتحة؟

25. (II) شقّ ضيق ينتج حيودًا لضوء طول موجته 650 nm بحيث إنّ هدبة الحيود المركزية عرضها 4.0 cm على شاشة تبعد 1.50 m. ماذا سيكون عرض الهدبة المركزية لضوء طول موجته 420 nm؟

26. (II). لطول موجة λ. ما أكبر عرض لفتحة بحيث لا يكون هناك هدب حيود معتمة؟

24 – 6 و 24 – 7 محززات الحيود

27. (I) عند أيّ زاوية سوف تظهر هدبة لامعة لضوء 560 nm في رتبة الطّيف الثانية عندما تسقط على محززة حيود شقوقها تبعد $1.45 \times 10^{-3}\,\text{cm}$ عن بعضها؟

28. (I) شبكة حيود تحتوي 3500 line/cm، تنتج هدبة في رتبة الطّيف الثالثة عند زاوية $28.0°$. ما طول موجة الضّوء المستعمل؟

29. (II) كم عدد الخطوط في كلّ سنتيمتر تحتوي محززة حيود إن أنتجت الرتبة الثالثة عند $18.0°$ لضوء طول موجته 630 nm؟

30. (II). شبكة حيود تحتوي 8300 lines/cm. كم عدد الرتب الطّيفية الكاملة التي يمكن رؤيتها (400 nm إلى 700 nm) عندما تضاء بضوء أبيض؟

31. (II) الرتبة الأولى لخط من ضوء طول موجته 589 nm يسقط على محززة حيود يشاهد عند زاوية $15.5°$. ما المسافة بين الخطوط؟ عند أيّ زاوية سوف تشاهد الرتبة الثالثة؟

32. (II) محزّزة حيود فيها $6.0 \times 10^{5}\,\text{lines/m}$. جد المدى الزاويّ في الرتبة الثانية بين الضّوء الأحمر (طول موجته $7.0 \times 10^{-7}\,\text{m}$) والضّوء الأزرق (طول موجته $4.5 \times 10^{-7}\text{m}$).

33. (II) يسقط ضوء عموديًا على محزّزة حيود تحتوي 9700 line/cm. وتبين أنّه يحتوي ثلاثًا في طيف الرتبة الأولى عند الزاويّة $31.2°$، و$36.4°$، و $47.5°$. ما هي هذه الأطوال الموجيّة؟

34. (II) ما أكبر رتبة طيف يمكن رؤيتها إذا تمّ إضاءة محزّزة حيود تحتوي 6000 lines / cm بضوء ليزر 633 nm؟ افرض أنّ السقوط عموديّ.

35. (II) يمكن رؤية رتبتين فقط من رتب الطّيف في كلّ جانب من الهدبة المركزية عند إسقاط ضوء أبيض على محززة حيود. ما أكبر عدد حزوز لكلّ سم لهذه المحزّزة؟

36. (II) ضوء أبيض يحتوي أطوالا موجية من 410 nm إلى 750 nm يسقط على محزّزة تحتوي 8500 lines/cm. فما عرض الطّيف ذي الرتبة الأولى على شاشة تبعد 2.30 m؟

37. (II) استعمل ليزر He – Ne لإنتاج ضوء وحيد اللون طول موجته $\lambda = 6.328 \times 10^{-7}\,\text{m}$ لمعايرة محززة حيود انعكاسية في جهاز تحليل الطّيف. أول خط حيود وجد عند زاوية $21.5°$ بالنسبة للشعاع الساقط. ما عدد الحزوز لكلّ سم على هذه المحززة؟

38. (II) خطان طيفيان في الرتبة الأولى للطيف. قيس الخطان لمحززة تحتوي 9500 line/cm عند الزوايا بالنسبة للمركز على الجانبين. $+26°38'$، $+41°08'$ و $-26°48'$، $-41°19'$. ما هي الأطوال الموجيّة؟

24 – 8 تداخل الغشاء الرقيق

39. (I) إذا كان سمك فقاعة صابون 120 nm. فما طول موجة الضّوء الذي ينعكس بقوة عند مركز السطح الخارجي عندما يُضاء بلون أبيض بشكل عموديّ؟ افرض أنّ $n = 1.34$.

40. (I) كم البعد بين الهدب المعتمة في (المثال 24 – 8) إذا كانت الصفائح الزجاجية بطول 26.5 cm؟

41. (II) ما أقلّ سمك لغشاء صابون $(n = 1.42)$ بحيث يبدو أسود عند إضاءته بضوء 480 nm؟ افرض أنّ هناك هواء على جانبي الغشاء.

42. (II) تبدو عدسة صفراء مخضرّة ($\lambda = 570\,\text{nm}$ الأقوى) عندما ينعكس ضوء أبيض عنها. ما أقلّ سمك للطلاء $(n = 1.25)$ الذي تعتقد أنّه استعمل على هكذا زجاج $(n = 1.52)$، ولماذا؟

43. (II) شوهدت 31 هدبة مضيئة، و31 هدبة معتمة (دون عدّ البقعة المعتمة المركزية) عندما يسقط ضوء 550 nm عموديًا على عدسة مستوية محدبة موضوعة على سطح زجاج منبسط. (الشّكل 24 – 31). كم هو المركز أكثر سمكًا بالنسبة للحواف؟

44. (II) صفيحة فلزية رقيقة تفصل نهاية قطعتين مستويتين ضوئيًّا من الزجاج. كما في (الشّكل 24 – 33). عندما يسقط ضوء طول موجته 670 nm عموديًا. نستطيع مشاهدة 28 خطا معتما (واحد عند كلّ نهاية). ما سمك الصفيحة؟

45. (I) ما أقلّ سمك لطبقة هواء بين صفيحتين زجاجيتين إذا أريد للزجاج أن يبدو لامعًا عند سقوط ضوء 450 nm عموديًا عليه؟ ما السمك إذا ظهر الزجاج معتمًا؟

46. (II) قطعة من مادة يعتقد أنها ماس مسروق $(n = 2.42)$ غمرت في زيت $(n = 1.43)$ وتمّ إضاءتها بضوء غير مستقطب. وجد أنّ الضّوء المنعكس يكون مستقطبًا كليًّا عند زاوية $59°$. فهل هي من الماس حقيقة؟

47. (III) غشاء رقيق من الكحول $(n = 1.36)$ فوق صفيحة زجاجة مستوية $(n = 1.51)$. عندما يسقط ضوء وحيد اللون. يمكن تغيير طول موجة. عموديًا. فإنّ الضّوء المنعكس يكون أقلّ ما يمكن لطول الموجة $\lambda = 512\,\text{nm}$ وأكبر ما يمكن لطول الموجة $\lambda = 640\,\text{nm}$. ما أقلّ سمك لهذا الغشاء؟

48. (III) عند غَمْرِ جهاز حلقات نيوتن والشّكل (24 – 31) في سائل، يقلّ قطر الحلقة الثامنة المعتمة من $2.92\ cm$ إلى $2.48\ cm$. فما معامل انكسار السائل؟

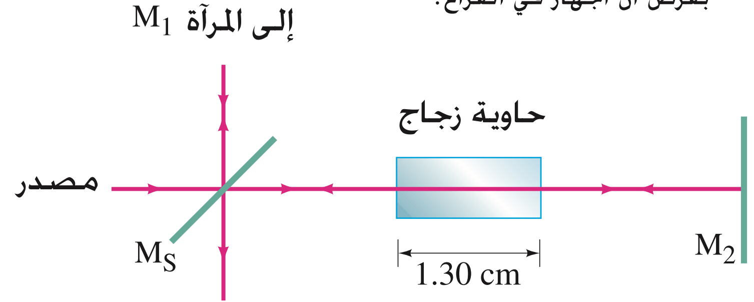
* 24 – 9 جهاز تداخل ميكلسون

49.* (II) ما طول موجة الضَّوء الذي يدخل جهاز ميكلسون إذا أمكن عدّ 644 هدبة مضيئة عندما تتحرك المرآة القابلة للحركة $0.225\ mm$؟

50.* (II) يتصل ميكرومتر بالمرآة المتحركة لجهاز التّداخل. عندما يحكم إغلاق الميكرومتر على صفيحة فلزية رقيقة، عدد الهدب المضيئة التي نعدها بالمقارنة بالميكرومتر المفرغ، هو 272. ما سمك الصفيحة؟ طول موجة الضَّوء المستخدم $589\ nm$؟

51.* (II) ما المسافة التي يجب أن تتحركها المرآة M_1 في جهاز تداخل ميكلسون إذا كان على 850 هدبة أن تعبر خط المرجع لضوء طول موجة $589\ nm$؟

52.* (III) أحد شعاعي جهاز تداخل (الشّكل 24 – 59) يمر عبر وعاء زجاجي يحتوي فجوة عمقها $1.30\ cm$. وعندما يسمح لغاز أن يملأ الوعاء تدريجيًّا، نعدّ 236 هدبة معتمة تعبر الخط المرجعي. الضَّوء المستعمل طول موجة $610\ nm$. احسب معامل الانكسار للغاز بفرض أنّ الجهاز في الفراغ.



الشّكل 24 – 59 (مسألة 52)

24 – 10 الاستقطاب

53. (I) مستقطبتان موضوعتان والزاوية بينهما °65. يسقط عليهما ضوء غير مستقطب. ما نسبة الضَّوء النافذ؟

54. (I) ما هي زاوية بروستر لسطح يفصل بين هواء – زجاج ($n = 1.52$)؟

55. (II) ما هي زاوية بروستر للماس المغمور في الماء إذا سقط الضَّوء على الماس ($n = 2.42$) في أثناء انتقاله في الماء؟

56. (II) رتبت مستقطبتان بحيث يكون الضَّوء الذي يمرّ خلالهما أكبر ما يمكن. عند أيّ زاوية توضع إحداهما بحيث تهبط الشدة بمقدار النصف؟

57. (II) عند أيّ زاوية يجب وضع محاور مستقطبتين لتقليل شدة الضَّوء غير المستقطب الساقط إلى (أ) $\frac{1}{3}$؟ (ب) $\frac{1}{10}$؟

58. (II) مستقطبتان وضعتا بزاوية °40 بينهما. وأسقط عليهما ضوءٌ مستقطب خطيًّا. إذا نفذ من خلالهما 15% من الضَّوء فقط . فماذا كان الاتجاه الأصلي لاستقطاب الضَّوء الساقط؟

59. (II) مستقطبتان وضعتا بزاوية °38.0 بينهما. ضوء مستقطب بـ °19.0 بالنسبة لكلٍّ منهما يمرّ خلالهما. ما نسبة انخفاض الشدة؟

60. (II) ماذا ستكون زاوية بروستر على سطح الماء لضوءٍ قادمٍ من تحت سطح الماء؟ قارن بزاوية الانعكاس الكلّي الداخلي وبزاوية بروستر من السطح العلوي.

61. (II) يمرّ ضوء غير مستقطب من خمس صفائح بولارويد. محور كلّ منها يصنع زاوية °45 مع سابقته. فما شدة الضَّوء النافذ؟

مسائل عامة

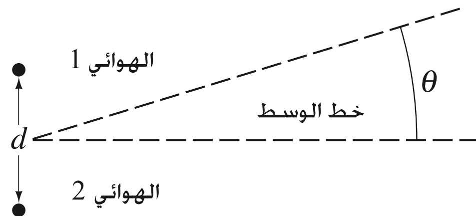
62. ضوءٌ طول موجته $5.0 \times 10^{-7}\ m$ يمرّ خلال شقين متوازيين ويسقط على شاشة تبعد $4.0\ m$. الهدب المضيئة المتجاورة تبعد $2.0\ cm$. (أ) جد البعد بين الشّقّين. (ب) الشّقّان نفساهما تمَّت إضاءتهما لاحقًا بضوء ذي طول موجة مختلفة، والهدبة الخامسة معتمة لهذا الضَّوء تقع في مكان الهدبة الرابعة المعتمة نفسها للضَّوء السابق. ما طول موجة الضَّوء الثاني؟

63. موجات التلفزيون والمذياع المنعكسة عن الجبال والطائرات يمكن أن تتداخل مع الإشارات المباشرة من المحطة. (أ) ما نوع التّداخل الذي سوف يحدث عندما تصل موجات تلفزيون $75\ MHz$ إلى المستقبل مباشرة من محطة بعيدة، وتنعكس من طائرة قريبة على ارتفاع $118\ m$ فوق المستقبل؟ افرض تغير $\frac{1}{2}\lambda$ في طور الإشارة عند الانعكاس. (ب) أيّ نوع من التّداخل سوف يحصل إذا كانت الطائرة أقرب بـ $22\ m$ إلى المستقبل؟

64. ضوء أحمر من ثلاثة مصادر مختلفة يعبر خلال محززة حيود تحتوي $3.00 \times 10^5\ lines/m$. الأطوال الموجيّة للخطوط الثلاث هي: $6.56 \times 10^{-7}\ m$ (هيدروجين)، و $6.50 \times 10^{-7}\ m$ (نيوتن)، و $6.97 \times 10^{-7}\ m$ (أرغون). احسب زاوية الحيود ذات الرتبة الأولى لخطوط هذه المصادر.

65. ضوء طول موجته $590\ nm$ يمرّ خلال شقين ضيقين البعد بينهما $0.60\ mm$. الشاشة على بعد $1.70\ m$. وهناك مصدر ضوئيّ آخر (مجهول طول الموجة) ينتج هُدبة من الرتبة الثانية $1.33\ mm$ أقرب إلى الهدبة المركزية من تلك للضَّوء $590\ nm$. ما طول موجة الضَّوء المجهول؟

66. محطة مذياع تبث على $102.1\ MHz$ من هوائيين متشابهين على الارتفاع نفسه، ولكن يفصلهما مسافة $8.0\ m$ أفقية (d). (الشّكل 24 – 60). وجدت إشارة ذات شدة قصوى على خط الوسط وتمتد أفقيًّا في الاتجاهين. إذا اعتبرنا خط الوسط عند الزاوية °0. فعند أيّ زاوية (أو زوايا) θ نكشف شدة قصوى؟ إشارة ذات شدّة دنيا؟ افرض أنّ الأقيسة كلّها أخذت عند مسافات أكثر بكثير من $8.0\ m$ من أبراج الهوائيات.



الشّكل 24 – 60 (مسألة 66)

67. يقف معلّمٌ بعيدًا خلف باب عرضه 0.88 m، وينفخ في صفارة ترددها 750 Hz. مع إهمال الانعكاسات، احسب عند أيّ زاوية (أو زوايا) لا يمكن سماع الصفارة بوضوح على أرض الملعب خارج الباب.

68. إذا سقط ضوء على شقّ ضيق عرضه D بزاوية $30°$ مع العمودي، فصف نمط الحيود.

69. أجنحة نوع من الخنافس لها سلسلة من الخطوط عبرها. عندما يسقط ضوء 460 nm عموديًا لينعكس عن الجناح، يبدو الجناح مضيئًا عند النظر إليه بزاوية $51°$. ما البعد بين هذه الخطوط؟

70. ما عدد الحزوز لكلّ سنتيمتر في محززة حيود إذا أريد أن لا تكون هناك رتبة طيف ثانية لأيّ طول موجة مرئيّ؟

71. بيّن أنّ الرتبتين الثانية والثالثة للضّوء الأبيض تتطابقان دائمًا في محززة الحيود. ما الأطوال الموجيّة التي تتطابق تمامًا؟

72. عند سقوط ضوء الصوديوم الأصفر $\lambda = 589\ nm$ على محززة حيود، فإنّ الرتبة الأولى على شاشة تبعد 60.0 cm تقع على بعد 3.32 cm من الهدبة المركزية. مصدر آخر يعطي خطًّا على بعد 3.71 cm من المركز. ما طول موجة المصدر الجديد؟ كم عدد الخطوط لكلّ سنتيمتر في محززة الحيود؟

73. يسقط ضوء على محزّزة حيود تحتوي 8600 lines/cm، ويشاهد النمط على شاشة على بعد 2.5 m من المحززة. يتكون الضّوء الساقط من موجتين: $\lambda_1 = 4.6 \times 10^{-7}\ m$ ، و $\lambda_2 = 6.8 \times 10^{-7}\ m$. احسب المسافة الخطية بين خطّي هاتين الموجتين في الرتبة الأولى على الشاشة.

74. ما معامل الانكسار لمادة شفافة إذا لزم على الأقلّ سمك 150 nm، عندما توضع على الزجاج لتخفيض الانعكاس إلى الصفر تقريبًا عند سقوط ضوء 600 nm عموديًا عليه؟ هل هناك جواب آخر؟

75. ضوء وحيد اللون متغير طول الموجة يسقط عموديًا على غشاء رقيق من البلاستيك في الهواء. الضّوء المنعكس أقلّ ما يمكن فقط لطول الموجة $\lambda = 512\ nm$ و $\lambda = 640\ nm$ في الطّيف المرئيّ. ما سمك الغشاء$(n = 1.58)$ ؟ [مساعدة: افرض قيمًا متتابعة لـ m].

76. قارن أقلّ سمك مطلوب لطلاء غير عاكس $(n = 1.38)$ لعدسة زجاجية بحيث نحذف: (أ) الضّوء الأزرق (450 nm) أو (ب) الضّوء الأحمر (700 nm) عند السقوط العمودي.

77. ما أقلّ سمك (عدا الصفر) لطبقة الهواء بين سطحين زجاجيين مستويين بحيث يبدو الزجاج داكنا عن سقوط ضوء 640 nm عموديًا عليه؟ ماذا لو كان الزجاج يبدو مضيئًا؟

78. افرض أنّك شاهدت الضّوء **النافذ** من طبقة رقيقة على صفيحة زجاجية مستوية. ارسم مخطّطًا يشبه (الشّكل 24–30، أو 24 – 36). وصف الشروط اللازمة للحصول على لمعان أو تعتيم. اعتبر القيم الممكنة كلّها لمعامل الانكسار. قارن القيم النسبية للقيم الدنيا مع القيم العظمى والصفر.

79. عند أيّ زاوية فوق الأفق تكون الشّمس عندما يكون الضّوء المنعكس عن بحيرة مستقطبًا بصورة عظمى؟

80. عند أيّ زاوية يجب وضع مستقطبتين لتقليل شدة الضّوء غير المستقطب الساقط بمعامل إضافي (بعد أن يحذف المستقطب الأول نصف الشدة) قدره (أ) 4؟ (ب) 10؟ (جـ) 100؟

81. يسقط ضوء غير مستقطب على صفيحتين مستقطبتين، محورا نفاذهما متعامدان. وضعت مستقطبة ثالثة بينهما بحيث يصنع محورها زاوية $62°$ مع محور الأولى. (أ) ما نسبة شدة الضّوء النافذ إلى الشدة الأصلية؟ (ب) ماذا يحدث لو وضعت المستقطبة الثالثة قبلهما؟

82. وضعت أربع مستقطبات على الترتيب بحيث تكون محاورها عمودية، عند $30°$ مع العمود، وعند $60°$ مع العمود، وعند $90°$ مع العمود. (أ) احسب النسبة من شدة الضّوء غير المستقطب والتي ستنفذ من المستقطبات الأربع. (ب) هل يمكن **تقليل** الضّوء النافذ بإزالة إحدى المستقطبات؟ إذا كان كذلك، فأيّها؟ (جـ) هل يمكن أن تكون شدة الضّوء النافذ معدومة بإزالة مستقطبات؟ إذا كان كذلك فأيّها؟

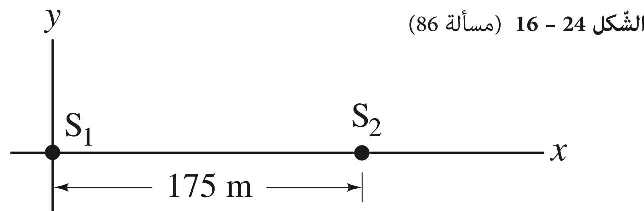
83. يمر شعاع ليزر عبر شق عرضه 1.0 cm ويوجه نحو القمر الذي يبعد نحو 380,000 km من الأرض. افرض أنّ الليزر يصدر موجات بطول 630 nm (الضّوء الأحمر لليزر He – Ne). احسب عرض الشّعاع عند وصوله القمر.

84. سلسلة من المستقطبات توضع بحيث يختلف محور كلّ منها $10°$ عن سابقته. أُسقط ضوء غير مستقطب على هذه السلسلة. كم مستقطبة تخترق الضّوء قبل أن تنخفض شدته إلى $\frac{1}{4}$ شدته الأصلية؟

85. غشاءٌ رقيقٌ من الصابون $(n = 1.34)$ يغطّي قطعةً من الزجاج $(n = 1.52)$. ما سمك الغشاء الذي يعكس الضّوء الأحمر 643 nm بقوّةٍ عندما يُضاء عموديًّا بضوء أبيض؟

86. افرض هوائيين يصدران موجات مذياع بتردد 6.0 MHz متفقين في الطور. المصدران موضوعان عند S_1 و S_2 تفصلهما مسافة $d = 175\ m$، (الشّكل 24 – 61). ما أول ثلاث نقاط على محور y حيث تكون الإشارتان من المصدرين مختلفتين في الطور (قمة إحداهما تقابل أسفل الأخرى)؟

الشّكل 24 – 16 (مسألة 86)



87. حزمةٌ ضوئيّةٌ متوازيةٌ تحتوي موجتين: 420 nm و 650 nm، تدخل زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) الصوّان أو لمنشور متساوي الأضلاع. (الشّكل 24 – 58). (أ) ما قيمة الزاوية بين الشّعاعين عند مغادرة المنشور؟ (ب) أعد الجزء (أ) لمحززة حيود تحتوي 6200 lines/cm.

*88. عدسة ليوسيت مستوية محدّبة أحد سطحيها مستوٍ والآخر له $R = 18.4\ cm$. تستعمل لرؤية جسم يبعد 66.0 cm والذي هو مزيج من الأحمر والأصفر. معامل انكسار ليوسيت 1.5106 للضّوء الأحمر و 1.5226 للضّوء الأصفر. ما موقع الصورتين الأحمر والأصفر كما تكونهما العدسة؟ [مساعدة: انظر البند 23 – 10].

إجابات التمارين

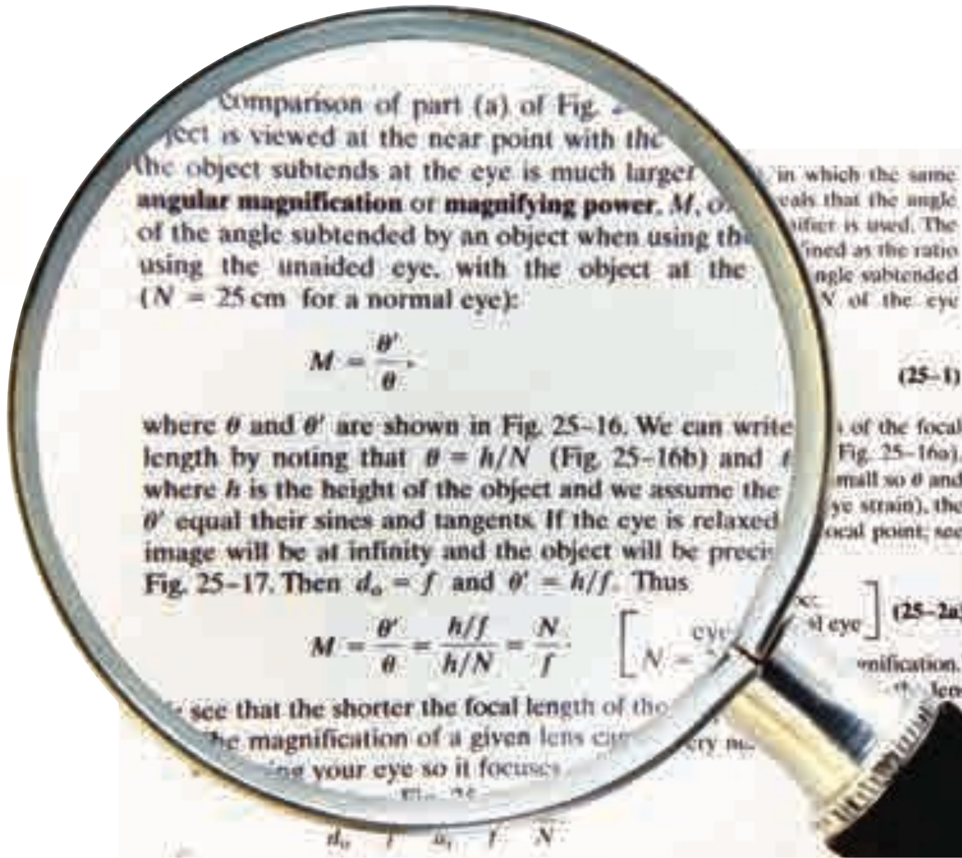
أ. 2.5 mm

ب. أضيق

ج. 4900 lines/cm

د. A

هـ. صفر لكلّ من (أ) و (ب)؛ لأنّ المستقطبين المتتابعين والزاوية بينهما $90°$ يلغيان الضّوء المستقطب كلّه بزاوية $45°$. ويجب إدخاله بين المستقطبين الآخرين إذا أردنا للضّوء أن ينفذ.



العدسة المكبّرة هي إحدى الأدوات الضّوئيّة التي سنناقشها في هذا الفصل؛ لأنّها أبسطها. وهي هنا تكبّر الصّفحة 705 من هذا الفصل، والتي تصف طريقة عمل العدسة المكبّرة حسب نموذج الأشعّة. كما سنناقش في هذا الفصل أيضًا القُمرات (آلات التّصوير) ذات الفيلم، والقُمرات الرّقميّة، وعين الإنسان، والمقراب (التلسكوب)، والمجاهر (الميكروسكوبات)، إضافة لقدرة التحليل، وأشعة -X، والماسحات الإلكترونيّة (CT).

الفصل 25

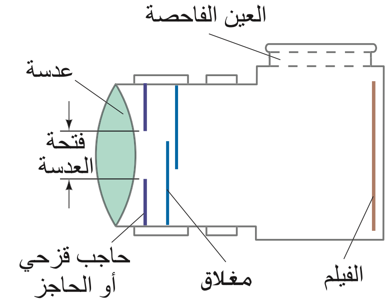
الاجهزة البصرية

في مناقشتنا لسلوك الضّوء في الفصلين السّابقين، وصفنا كذلك عددًا قليلًا من الأجهزة، كمقياس الطّيف وجهاز تداخل ميكلسون. في هذا الفصل، سنتناول بعض الأجهزة الأخرى الأكثر شيوعًا، والتي يستعمل معظمها العدسات، مثل الكاميرا، والمقراب (التلسكوب)، والمجهر، والعين البشريّة. ولوصف عملها؛ سنستخدم مخططات الأشعّة الضّوئيّة. وعلى أيّ حال، فإنّه لفهم بعض مظاهر تشغيلها؛ سنحتاج إلى معرفة الطبيعة الموجية للضّوء.

25-1 الكاميرات الفلمية، والكاميرات الرّقميّة

تطبيق الفيزياء
الكاميرا

تتكوَّن العناصر الأساسيّة **للكاميرا** من: العدسة، وصندوق خفيف محكم، ومغلاق يسمح للضوء بالعبور خلال العدسة لفترةٍ وجيزة. وفي الكاميرا التقليديّة قطعةٌ من فيلم (الشّكل 25-1). أو في الكاميرا الرّقميّة مِجَسٌّ إلكترونيٌّ. عند فتح المغلاق، يتم تركيز الضّوء القادم من أجسام خارجية في مجال النّظر عن طريق العدسة كخيال على الفيلم أو المِجَسّ. يحتوي الفيلم مواد كيميائية حساسة للضوء تتغير عندما يسقط الضّوء عليها. وفي عملية تظهير الفيلم، تسبب التفاعلات الكيماوية تحوّل المساحات المتأثرة بالضّوء إلى مناطق معتمة، وبهذا يُسجَّل الخيال على الفيلم.* يمكنك رؤية الخيال بنفسك إذا أزلت غطاء الكاميرا الخلفي، ونظرت من خلال ورقة رقيقة (التي يتكون عليها الخيال) موضوعة حيث يجب أن يكون الفيلم عن فتح المغلاق.



الشّكل 25-1 الكاميرا البسيطة.

الكاميرا الرّقميّة، مِجَسَّات CCD

تطبيق الفيزياء
الكاميرا الرّقميّة

في **الكاميرا الرّقميّة**، يستعاض عن الفيلم بمجسٍّ شبه موصل يعرف بـ "أداة مقرونة بالشحنة" **(CCD) (charge-coupled device)**. يتكون مِجَسُّ CCD من ملايين عناصر الصّورة الصغيرة (pixels) – (انظر الشّكل 25 - 49). مِجَسّ 3-MP (مغابيكسل) ** قد يحتوي على نحو 1500 عنصر عموديًّا، و2000 عنصر أفقيًّا في مساحة بحدود 12 mm × 9 mm. إنّ الضّوء الذي يصل أيّ عنصر صورة يحرّر إلكترونات من شبه الموصل. وكلّما كانت شدّة الضّوء أكثر، تراكمت الشحنة خلال زمن التّعرض القصير للضّوء. تحمل الأقطاب شحنة كلّ عنصر (بالتسلسل مع الزّمن، سطرًا بسطر – لذلك سميت "مقرونة بالشحنة") إلى معالج الصّورة الذي يخزّن السّطوع النسبيّ لعناصر الصّورة، ويسمح بإعادة تكوّن الخيال لاحقًا على شاشة حاسوب أو طابعة.

إنّ CCD قابل للاستعمال ثانية؛ فحال انتقال شحنات "عنصر الصّورة" إلى الذاكرة، يمكن التقاط صورة جديدة.

يمكن تحقيق اللون بمرشحات حمراء، وخضراء، وزرقاء فوق عناصر الصّورة المتعاقبة كما هو مبين في (الشّكل 25-2)، مثلما يحدث في أنبوب الأشعّة المهبطية (CRT) الملون، أو شاشة البلورات السّائلة (LCD). يحتوي نوع المِجَسّ المبين في (الشّكل 25-2) من العناصر الخضراء ضعف ما يحتويه من العناصر الحمراء والزرقاء (يُزعم أنّ اللون الأخضر ذو أثر في حدّة الإحساس). واللون الذي يُحلّل بالحاسوب عن كلّ عنصر صورة هو متوسط شدّة ذلك العنصر والألوان الأقرب إليه.

لتقليل مقدار الذاكرة المخصصة لكلّ صورة، فإنّ برامج الضّغط يمكن أن تجد المتوسط لمجموعة عناصر، ولكن ينتج من ذلك ضياع في الحدّة أو "قدرة التحليل".

الشّكل 25-2. جزء من مِجَسّ CCD. مجموعة مربعة من أربعة عناصر صورة $\frac{RG}{GB}$ وتدعى أحيانًا "عنصر الصّورة الملونة".

اللون بكسل (عناصر الصورة)

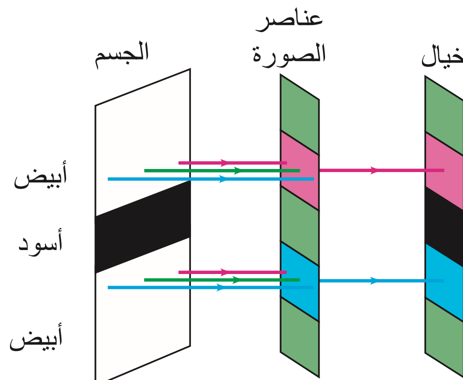
الأقطاب

* الكاميرات الرّقميّة

يمكن أن تنتج صورًا تحتوي عيوبًا اصطناعية (الأخطاء في الصّورة غير الموجودة في الأصل). مثال على ذلك باستعمال عناصر الصّورة الفسيفسائية في (الشّكل 25-2) الموصوفة في (الشّكل 25-3). وهناك تقانة (تكنولوجيا) أخرى تستعمل نظام طبقة شبه – شفافة من السليكون شبه الموصل باستغلال الحقيقة العلمية التي تشير إلى أنّ موجات الضّوء المختلفة تخترق السليكون لأعماق مختلفة. وكلّ عنصر pixel هو مجموعة طبقات شبه شفافة، واحدة لكلّ لون. تمتص الطبقةُ العلوية الضّوء الأزرق، ويسمح للأخضر والأحمر بالمرور. أما الطبقة الثانية فتمتص الأخضر، في حين تمتص السفلى الأحمر. وهكذا، فإنّ الألوان الثلاثة تكشف في كلّ عنصر صورة، وبذلك نحصل على تحليل أفضل للألوان، وعيوب طفيفة.

* يدعى هذا بالصّورة السالبة؛ لأنّ المساحات الداكنة تقابل الأجسام المضيئة والعكس صحيح. وتحدث العملية نفسها خلال الطبع لإنتاج صورة بالأسود والأبيض" موجبةٌ من السالبة. ويوجد في الفيلم الملون ثلاث طبقات أصبغة تعود للألوان الأساسية الثلاثة.

** كل لون من ألوان عنصر الصّورة يُعد عنصر صورة مستقل. بالمقابل في شاشة LCD (البند 24-11)، كل مجموعة من ثلاث طبقات دون العنصر تعد عنصر صورة مستقل (عد بطريقة محافظة).



الشّكل 25-3. افرض أننا التقطنا صورة تتضمن خطًا أسود (هو الجسم) على خلفية بيضاء. صورة هذا الجسم لها هالة ملونة (أحمر في الأعلى، وأزرق في الأسفل) تعود إلى الترتيب الفسيفسائي لعناصر اللون، كما هو مبين للألوان النافذة. إنّ أخذ المتوسط بوساطة الحاسوب يقلل المشكلات اللونيّة مثل هذه (الأخضر أعلى الصّورة وأسفلها يمكن أن يعدّل مع عناصر الصّورة القريبة للحصول على أبيض أو تقريبًا كذلك)، ونتيجة لذلك، تكون الصّورة ضبابية. أما عنصر اللون الطّبقيّ الموصوف في النّص فيمكن أن يتجنب هذا العيب الاصطناعيّ.

ضبط الكاميرا

هناك ثلاثة ضوابط رئيسة في الكاميرات ذات النوعية الجيدة هي: مغلاق السرعة، وعائق f-. والتّعديل البؤريّ (التّبئير). وعلى الرّغم من أنّ معظم الكاميرات في هذه الأيام تقوم بتلك الضوابط آليًّا، إلاّ أنّ فهم هذه الضوابط أمر مهم لاستعمال الكاميرا بفاعلية.

مغلاق كاميرا رقميّ

وللقيام بتصوير متميز؛ لا بدّ من الاطلاع على الدليل العمليّ للكاميرا (الشّكل25-4). تعود سرعة المغلاق إلى مدة فتحه، وتعريض الفيلم للضّوء، وقد تتراوح بين ثانية واحدة أو أكثر ("فترة التعريض") إلى $\frac{1}{1000}$ s أو أقلّ. ولتجنب الضّبابية النّاتجة من حركة $\frac{1}{1000}$ s الكاميرا، تستعمل عادة سرعات أكبر من. إذا كان الجسم متحركًا، فإننا نحتاج إلى سرعات مغلاق أسرع "**وقف**" الأداء. وقد يفتح المغلاق "خلف العدسة" أو يغلق كما في (الشّكل 25-1). أو يكون مغلاق "المستوى البؤريّ" حيث تكون ستارة متحركة مباشرة أمام الفيلم.

تحتوي الكاميرات الرّقميّة "**مغالق إلكترونيّة**" وهي أزمنة التوضيب الوجيزة لتجميع شحنات عناصر الصّورة؛ كما يمكن أن تحتوي مغلاقًا ميكانيكيا يفتح عادة بحيث يمكن رؤية المشهد على شاشة LCD المبينة في الداخل، ولكنّه يغلق قُبيّل التقاط الصّورة، يفتح قليلًا لالتقاط الصّورة، ثم يعاد فتحه فيما بعد. الكاميرات الساكنة التي تسج ل مشاهد قصيرة يجب أن يكون لها وقت "نمذجة" سريع، ووقت "إزالة" (الشحنة) كي نلتقط صورًا بمعدل 12 أو 15 إطارًا في الثانية.



الشّكل 25-4. في هذه الكاميرا، توجد محددات حاجز f- وحلقة التّعديل البؤريّ على عدسة الكاميرا. يتم اختيار سرعات المغلاق على الدولاب الصغير في الجزء العلوي لجسم الكاميرا.

حاجز f-

يجب ضبط **حاجز** f- مقدار الضّوء الذي يصل الفيلم بحرص شديد لتجنب **دون التعرض** (ضوء قليل فتكون الصّورة معتمة، وتظهر الأجسام اللامعة فقط) أو **فوق التعرض** (ضوء كثير، لذلك تبدو الأجسام اللامعة كلّها متشابهة، ونتيجة ذلك نفقد التمييز، وتكون الصور باهتة). وللتحكم بالتعرض؛ يوضع "حاجز" أو حجاب قزحيّ، وفتحته ذات قطر متغير، خلف العدسة (الشّكل 25-1). يتغير اتساع الفتحة للتعديل في ظروف الضّوء اللامع أو المعتم، حساسية الفيلم* المستعمل، وسرعات المغلاق المختلفة. اتساع الفتحة يميز بما يُسَمّى **عدد** $f -$ أو **حاجز** $f -$، والذي يعرف كما يلي

$$f\text{-stop} = \frac{f}{D}$$

حيث f البعد البؤريّ للعدسة، و D قطر فتحة العدسة (الشّكل 25-1). مثلًا، عندما يكون لعدسة بعدها البؤريّ 50-mm فتحة $D = 25\,\text{mm}$، نقول إنها موضوعة عند $f/2$. وإذا وضعت هذه العدسة عند $f/8$، فإنّ الفتحة تكون ($50/6\frac{1}{4} = 8$)، $6\frac{1}{4}\,\text{mm}$. وعند سرعات المغلاق الأكبر، أو الضّوء الخافت، يجب استعمال فتحة عدسة كبيرة للحصول على تعريض صحيح. وهذا يقابل عدد حاجز f- أقلّ. وكلما كان عدد حاجز f- أصغر، كانت الفتحة أكبر، ويمرّ ضوء أكبر عبر العدسة إلى الفيلم. ويُشار إلى أصغر عدد حاجز f- (أكبر فتحة)"سرعة العدسةُ. أمّا الآن، فيمكن الحصول على عدسات $f/2.0$ بل وأسرع من ذلك. تكمن فائدة العدسة السريعة في أنها تسمح بالتقاط صور تحت ظروف إضاءة ضعيفة. وتتكون العدسات ذات النوعية الجيدة من عناصر متعددة لتقليل العيوب الموجودة في العدسات الرقيقة (البند 25 - 6). علامات عدد الحاجز $f -$ على العدسات الجيدة هي 1.4،1.0، 2.0، 2.8، 4.0، 5.6، 8، 11، 16، 22، 32 (الشّكل 25 - 4). تعود كلّ من هذه الحواجز إلى تقليل القطر بمعامل نحو $1.4 = \sqrt{2}$. ولأنّ كمية الضّوء التي تصل الفيلم تتناسب مع مساحة الفتحة، ولهذا تتناسب مع مربع القطر، فإنّ كلّ عدد حاجز $f -$ يقابل معامل 2 في شدّة الضّوء التي تصل الفيلم.

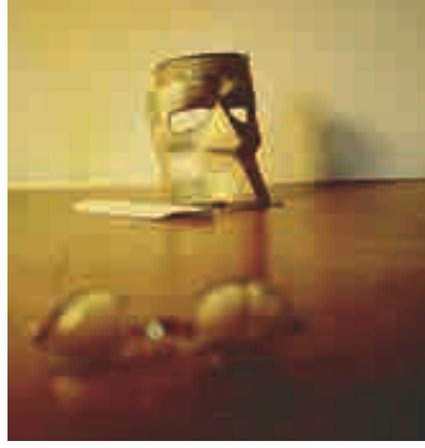
التّعديل البؤريّ

التّعديل البؤريّ (التّركيز): التّعديل البؤريّ هو عملية وضع العدسة في المكان الصّحيح بالنسبة إلى الفيلم للحصول على صورة أكثر وضوحًا. إنّ البُعدَ الأصغر للصورة (الخيال) يكون للأجسام الواقعة في اللانهاية (الرمز ∞ يستعمل للانهاية) ويساوي البُعدَ البؤريّ. وللأجسام الأقرب، يكون بُعْدُ الصّورة أكبَرَ من البُعْدِ البؤريّ. كما يمكن ملاحظة ذلك من معادلة العدسة $1/f = 1/d_o + 1/d_i$ (المعادلة 23-8). وللتركيز

على الأجسام القريبة؛ يجب تحريك العدسة بعيدًا عن الفيلم. وهذا يمكن عمله في العدسة اليدوية بإدارة حلقة حول العدسة.

* الأفلام المختلفة لها حساسيات مختلفة للضوء، وتُسَمّى "سرعة الفيلم" ويرمز إليها "عدد ASA " أو "عدد ISO ". يكون الفيلم الأسرع أكثر حساسية، ويحتاج إلى ضوء أقلّ للحصول على صورة جيدة. الأفلام السريعة تكون حبيبية، ولذلك تعطي حدّة أقلّ (أقلّ تحليلا) عند تكبيرها. وقد يكون للقمرات الرّقميّة أداة ضبط حساسة "ISO ". ضبط CCD "ليكون أسرع" لضوء قليل ينتج تشويشًا، وهذا يقابل الحبيبية.

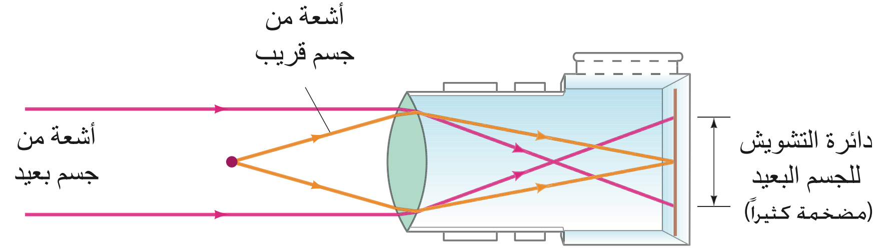

(أ)


(ب)

الشّكل 25-5 صور ملتقطة بكاميرا (أ) مضبوطة على جسم قريب، أمّا الجسم البعيد فيكون ضبابيًا. (ب) صور مضبوطة على جسم أبعد ليكون الجسم القريب ضبابيًا.

إذا ضبطت العدسة على جسم قريب، فسوف يتكون له خيال حادّ. في حين يكون خيال الأجسام البعيدة ضبابيًّا (غير واضح) (الشّكل 25-5). إنّ الأشعّة القادمة من نقطة على جسم بعيد ستكون غير مركزة؛ أي أنّها ستُكوّن دائرة على الفيلم كما يوضّح (بصورة مبالغ فيها) (الشّكل 25-6). وهكذا سوف ينتج الجسم البعيد خيالًا مكوّنًا من دوائر متطابقة، ويكون ضبابيًّا. تُسَمّى هذه الدوائر "دوائر التّشويش". وكي تتضمن الصّورة كلا من الأجسام القريبة والبعيدة؛ يمكنك محاولة وضع العدسة في مكان متوسط. ولضبط مسافة معينة، هناك مدى من المسافات تصبح بعده دوائر التّشويش صغيرة بحيث تكون الصّورة (الخيال) حادة بصورة معقولة. ويسمّى هذا عمقَ المجال. يتغير عمق المجال مع فتحة العدسة. إذا كانت الفتحة أصغر، فإنّ الأشعّة خلال الجزء المركزي من العدسة فقط هي التي تكون مقبولة، وهذه تكوّن دوائر تشويش أصغر لبعد جسم معين. وهكذا، عند فتحات عدسة أصغر، فإنّ مجالًا أكبر لأبعاد الأجسام سوف تقع ضمن دائرة التشويش هذه. وهكذا، فإنّ عمق المجال يكون أكبر. ويعتمد عمق المجال للقمرات 35-mm على دائرة تشويش قصوى قطرها 0.03 mm.

بعد الجسم(عمق الميدان)



الشّكل 25-6 عند وضع العدسة لتركز على جسم قريب، النقاط على جسم بعيد تنتج دوائر، لذا، تكون مشوشة. (الأثر موضح بصورة مبالغ فيها).

مثال 25-1 تعديل بؤرة (تركيز) الكاميرا

ما المسافة التي يجب أن تتحرّكها عدسة بعدها البؤريّ 50.0-mm من وضعها اللانهائيّ إلى مكان بحيث تتكوّن صورة واضحة لجسم على بعد 3.00 m؟

النّهج: لجسم في اللانهاية، تتكوّن الصّورة في البؤرة، وفق التعريف الذي نوقش في (البند 23-7). ولجسم على بعد 3.00 m، نستعمل معادلة العدسة، (معادلة 23-8)، لإيجاد بعد الخيال (بُعْدُ العدسة عن الفيلم أو المجَسّ).

الحلّ: عند الضبط لجسم في اللانهاية، تكون العدسة على بعد 50.0 mm من الفيلم. وعند ضبط العدسة لبعد جسم $d_o = 3.00$ m، يُعطى بعد الخيال بمعادلة العدسة.

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{50.0\text{ mm}} - \frac{1}{3000\text{ mm}} = \frac{3000 - 50}{(3000)(50.0)\text{ mm}} = \frac{2950}{150{,}000\text{ mm}}$$

ونحلّ لإيجاد d_i حيث $d_i = 50.8$ mm. لذا، علينا تحريك العدسة 0.8 mm بعيدًا عن الفيلم أو المجَسّ الرّقميّ.

تمرين A: إذا كانت العدسة في (المثال 25-1) تساوي 50.4 mm من الفيلم أو المِجَسّ، فجدْ بُعْدَ الجسم للحصول على صورة واضحة.

المثال المفاهيمي 25-2 سرعة المغلاق

لتحسين عمق المجال: يمكنك أن "تخفض" عدسة الكاميرا بخطوتين لعدد حاجز f- من $f/4$ إلى $f/8$. ماذا تعمل سرعة المغلاق للحصول على التعريض نفسه؟

الجواب: تتناسب كمية الضوء التي تسمح لها العدسة بالمرور مع مساحة فتحة العدسة. تقليل فتحة العدسة بخطوتين من عدد f- يقلّل القطر بمعامل 2 والمساحة بمعامل 4. وللحصول على التعريض نفسه، فإنّ المغلاق يجب أن يفتح لزمن أربعة أضعاف الزّمن السابق. فلو كانت سرعة المغلاق $\frac{1}{500}$ s فربما عليك زيادتها إلى $\frac{1}{125}$ s.

حِدّة الصّورة

وتعتمد حِدّة الصّورة على حبيبية الفيلم، أو عدد عناصر الصّورة للقمرات الرّقميّة، وليس على تعديل البؤرة الدقيق فقط؛ فالأفلام ذات الحبيبية الناعمة تكون "أبطأ"، وهذا يعني أنّها بحاجة إلى تعريض لمدةٍ أطول لمستوى معين من الضّوء.

تؤثر جودة العدسة بقوة في جودة الصّورة، وسنناقش تحليل العدسة، وأثر الحيود في (البندين 25-6 و 25-7). إنّ الحدّة أو التحليل لعدسة تعطى عادة بعدد الخطوط لكلّ 1 mm، وتقاس بتصوير مجموعة عيارية من الخطوط المتوازية على فيلم ذي حبيبة ناعمة. إنّ أقلّ بعد بين الخطوط التي يمكن تمييزها يعطي التحليل: فـ 50 خطّا لكلّ 1 mm يعدّ معقولا، و100 خط لكلّ 1 mm جيد جدّا.

عناصر الصّورة وقوة التّحليل

المثال 25-3 عناصر الصّورة وقوة التّحليل

تنتج كاميرا رقمية عالية الجودة 6-MP (6 ميغابيكسل) قدرةَ تحليل قصوى pixels 2000 × 3000 على مِجَسّ CCD أبعاده 16-mm × 24-mm. ما حدّة العدسة للاستفادة من قدرة التّحليل هذه؟

النّهج: نجد عدد عناصر الصّورة (بيكسل) لكلّ 1 mm، ونرغب أن تكون العدسة بتلك الجودة على الأقل.

الحلّ: يمكننا اختيار ارتفاع الخيال (2000 pixels في 16 mm) أو العرض (3000 pixels في 24 mm):

$$\frac{3000\ \text{pixels}}{24\ \text{mm}} = 125\ \text{pixels/mm}$$

نريد أن تكون العدسة قادرة على تحليل 125 lines/mm على الأقلّ.

إنْ لم نستطع ذلك، فعلينا استعمال عددٍ أقلّ من عناصر الصّورة وذاكرة أصغر.

ملحوظة: إنّ زيادةَ قدرة تحليل العدسة مشكلةٌ أصعب في هذه الأيّام من حشر عناصر صورة أكثر في CCD.

متى تكون الصّورة واضحة المعالم؟

المثال 25-4 صورة فوتوغرافيّة مكبّرة

تبدو الصّورة الفوتوغرافية المكبّرة واضحة المعالم عند مسافات النّظر العادية إذا كانت النّقاط أو الخطوط محللة (مفرّقة) 10 dots/mm تقريبا. هل تبدو الصّورة المكبّرة 8 × 10-inch الملتقطة بوساطة الكاميرا المذكورة في (مثال 25-3) واضحة؟ ما أكبر حجم تستطيع أن تكبر هذه الصّورة 3000 × 2000-pixel؟

النّهج: نفرض أنّ الخيال هو 3000 × 2000 pixels على 16 × 24-mm CCD كما في (المثال 25-3)، أو 125 pixels/mm. أي أنّنا نعمل صورة مكبرة 8 × 10-inch = 20 cm × 25 cm.

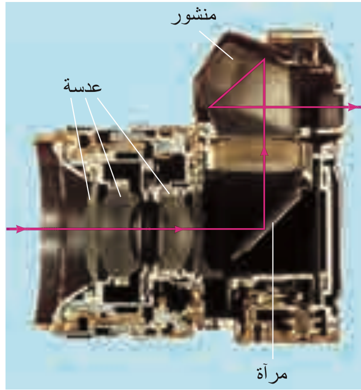
الحلّ: الجانب الأقصر في CCD هو 1.6 cm = 16 mm، وهذا الجانب من الصّورة هو 8 inches أو 20 cm. أي أنّ التكبير هو بمعامل 20 cm/1.6 cm = 12.5× (or 25 cm/2.4 cm ≈ 10×) وكي نملأ ورقة بأبعاد 8 × 10-inch؛ نفرض أنّ التكبير 12.5×. أي أنّ عناصر الصّورة مكبرة 12.5×؛ أي أنّ عدد عناصر الصّورة 125/mm على CCD تصبح 10/mm على الورقة. لذا، فإنّ 8 × 10-inch على الورقة هي تقريبًا أعلى عدد من عناصر الصّورة للحصول على صورة واضحة المعالم. إذا شعرت أنّ 7 نقاط لكلّ mm هو عدد كافٍ، فيمكنك التكبير إلى نحو 11 × 14 inches.

عدسات مقرّبة وذات زاوية واسعة.

تصنّف عدسات الكاميرات إلى: عاديّة، ومقرّبة (تيلفوتو) واسعة الزّاوية وفقًا للبعد البؤريّ وحجم الفيلم. تغطّي **العدسة العادية** الفيلم بمجال رؤية يعادل الرؤية الطبيعية تقريبًا. إنّ العدسة العادية لفيلم 35-mm لها بعد بؤري يقرب من 50 mm *. **العدسات المقرّبة (تيلفوتو)** تعمل كالمنظار لتكبير الخيال، ولها بعد بؤري أطول من العدسات العادية. وكما رأينا في (الفصل 23) (معادلة 23-9)، فإنّ طول الخيال، لبعد محدد للجسم، يتناسب مع بعد الخيال، وسيكون بعد الخيال أكبر لعدسة ذات بعد بؤري أطول للأجسام البعيدة، وأنّ طول الخيال يتناسب مع البعد البؤريّ تقريبًا. وهكذا، فإنّ عدسة مقربة بعدها البؤريّ 200-mm، وتستعمل في كاميرا 35-mm تنتج تكبيرًا 4× تكبير عدسة عادية 50-mm. أمّا **العدسة ذات الزّاوية الواسعة**، فلها بعدٌ بؤري أصغر من البعد البؤريّ للعدسة العادية، وعليه، فإنّ مجال الرّؤية يكون أوسع، وتبدو الأجسام أصغر. في حين يمكن تغيير البعد البؤريّ **لعدسة (التقريب) الزّوم** كي تتمكن من تصوير الأجسام البعيدة والقريبة.

ويمكن أن يكون للقمرات الرّقميّة "تزويم ضوئيّ" وهذا يعني أنّ العدسة تغيّر بعدها البؤريّ، وتحافظ على قدرة التحليل. أمّا "التّزويم الإلكترونيّ" أو "الرّقميّ" فيكبّر عناصر الصّورة، ولكن الصورة لاتكون واضحة تمامًا.

وهناك أنواع مختلفة من أنظمة الرّؤية موجودة في الكاميرات الآن. في كثير من الكاميرات، فإنّك تنظر خلال نافذة صغيرة فوق العدسة مباشرة كما في (الشّكل 25-1). في الكاميرا العاكسة ذات العدسة المنفردة (SLR)، فإنك تنظر، في الواقع، من خلال العدسة بوساطة مناشير ومرايا (الشّكل 25-7). هناك مرآة معلقة بزاوية °45 خلف العدسة، وتبتعد عن الطريق قبيل فتح المغلاق. إنّ الميزة الكبيرة لـ SLR هي أنّك ترى تمامًا ما سينتج على الفيلم. وهذا أيضًا صحيح في شاشات LCD في الكاميرا الرّقميّة إذا كانت جيدة الصنع.



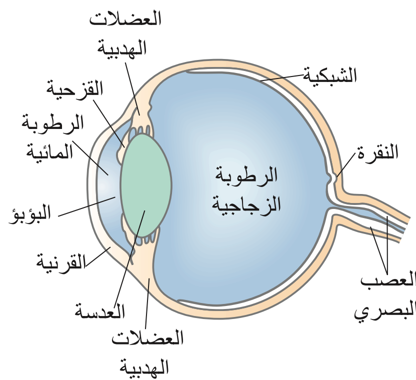
الشّكل 25-7 تبين الكاميرا العاكسة ذات العدسة المنفردة (SLR) كيفية النّظر إلى الخيال عبر العدسة بوساطة مرآة أو منشور متحرك

25-2 العين البشريّة؛ عدسات التّصحيح

تطبيق الفيزياء
العين

تشبه العين البشريّة الكاميرا في تركيبها الأساسي (الشّكل 25-8)، لكنّها أكثر تعقيدًا. داخل العين مملوء بمادة شفافة تشبه الهلام (جلّ) تُسَمّى الرّطوبة الزّجاجيّة ومعامل انكسارها $n = 1.337$. يدخل الضّوء هذا الحجم المغلق عبر القرنية والعدسة. ويوجد بين القرنية والعدسة سائل مائي؛ رطوبة مائية *aqua*، بمعامل انكسار $n = 1.336$. وهناك حاجز يُسَمّى **القزحية** (الجزء الملون من العين) يتكيّف آليّا لضبط كمية الضّوء التي تدخل العين، مثل الكاميرا. الفجوة في القرنية التي يمر الضّوء من خلالها (البؤبؤ) سوداء اللون كي لا يرتد منها الضّوء (إنّه **فجوة**)، وقليل جدّا من الضّوء قد ينعكس من الجزء الداخلي للعين. **الشّبكيّة** وهي الجزء الذي يقوم بدور الفيلم، أو المجسّ في الكاميرا، تكون على السّطح الخلفي المنحني للعين، وتتكون من ترتيب معقد من الأعصاب والمستقبلات تعرف بالقضبان والمخاريط التي تحوّل طاقة الضّوء إلى إشارات كهربائية تنتقل عبر الأعصاب. أمّا إعادة تشكيل الصّورة من هذه المستقبلات الرقيقة كلّها فيتم عمله في الدّماغ بصورة رئيسة، على الرّغم من أنّ بعض التحليل قد يتم في شبكة الأعصاب المتصلة ببعضها في الشبكة ذاتها. وهناك في مركز الشّبكيّة مساحة صغيرة تُسَمّى **النقرة**، والتي يساوي قطرها 0.25 mm تقريبا، حيث تحزم المخاريط بحيث تكون متقاربة جدّا، وهنا توجد أوضح صورة، وأفضل تمييز للألوان.

تشريح العين.



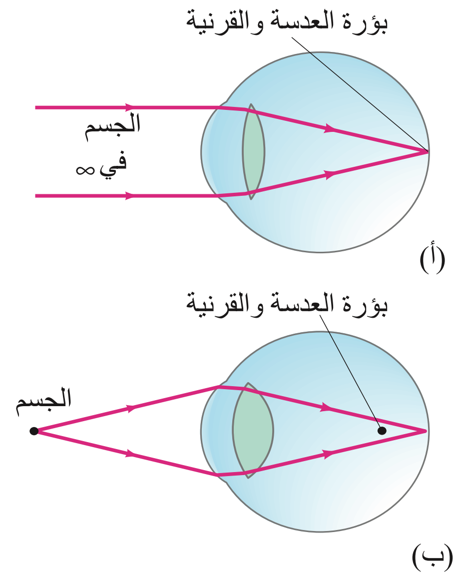
وبخلاف الكاميرا، فإنّ العين لا تحتوي مغلاقًا؛ فالعملية المكافئة تتم عن طريق النّظام العصبيّ الذي يحلل الإشارات لتكوين الأخيلة بمعدل 30 في الثانية تقريبًا. ويمكن مقارنة ذلك بالصّورة المتحركة، أو قمرات التلفزيون التي تعمل بالنقاط سلسلة من الصور الساكنة بمعدل 24 (في السّينما) أو 30 (التلفزيون الأمريكي) في الثانية. وعرضها السريع على الشاشة هو الذي يعطيها مظهر الحركة.

تعمل عدسة العين ($n = 1.386$ إلى 1.406) القليل بانحناء الأشعّة الضّوئيّة. ويتم معظم الانكسار عند السّطح الأمامي **للقرنية** ($n = 1.376$) وذلك عند التقائها بالهواء ($n = 1.0$) حيث تعمل العدسة على تعديل التركيز بصورة دقيقة عند مسافات مختلفة. ويتحقق ذلك بوساطة العضلات الهدبية (الشّكل 25-8)، التي تغير درجة انحناء العدسة بحيث يتغير البعد البؤريّ.

التّعديل البؤريّ للعين

* الكاميرا 35-mm تستعمل فيلمًا عرضه 35-mm. ويجب عدم الخلط بين هذا والبعد البؤريّ.

وللتركيز على جسمٍ بعيد؛ ترتخي العضلات الهدبية في العين. وتصبح العدسة رقيقة. كما هو مبيّن في (الشّكل 25-9أ)، وتتجمع الأشعّة المتوازية في البؤرة (على الشّبكيّة). وللتركيز على جسم قريب؛ تتقلص العضلات مما يؤدي لزيادة سمك مركز العدسة. (الشّكل 9-25ب). وبالتالي، يقل البعدّ البؤريّ. لذا، يمكن تجميع أخيلة الأجسام القريبة على الشّبكيّة، خلف البؤرة الجديدة. تُسَمّى عمليةُ التّعديل البؤريّ هذه **تكيّفَ العين**. أمّا أقربُ مسافة يمكن للعين التّركيز عليها بوضوح فتُسَمّى **النّقطةَ القريبة** للعين. وتكون للشباب عادة 25 cm. على الرّغم من أنّ الأطفال يستطيعون عادة التّركيز على أجسام قريبة بحدود. وكلّما زاد عمر الفرد، قلّت قدرته على التكيّف، وأصبحت النّقطة القريبة أبعد. والنّقطة البعيدة للشخص هي أبعد مسافة يمكن للشخص أن يرى الجسم بوضوح. ولأغراض معينة، من المفيد الحديث عن **عين طبيعية** (المتوسط للأفراد). تعرف بالعين التي نقطتها القريبة 25 cm، ونقطتها البعيدة في اللانهاية. ولاختبار النّقطة القريبة لعينيك؛ ضع هذا الكتاب قربهما، ثم ابدأ بإبعاده حتى ترى الطباعة واضحة.



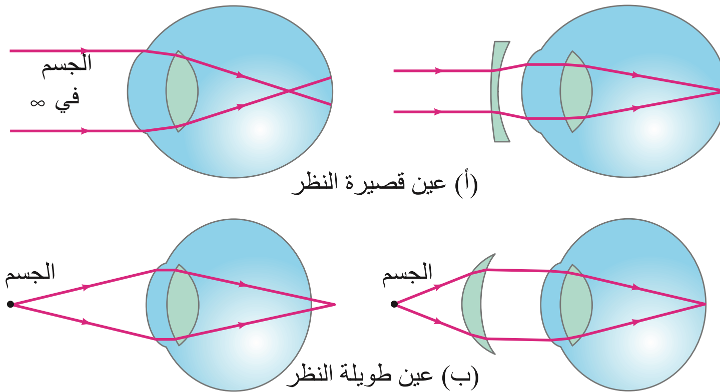
الشّكل 25-9. تكيّف العين الطّبيعيّة: (أ) العدسة مرتخية، مركزة في اللانهاية. (ب) يزداد سمك العدسة، مركزة على جسم قريب.

العين "الطبيعية" هي عين مثالية. كثير من الناس لهم عيون لا تتكيف ضمن المدى "الطبيعي" 25 cm إلى اللانهاية، أو أنّ فيها عيبا آخر. وهناك عيبان شائعان بين الناس هما قِصَرُ النّظر وطوله، اللذان يمكن تصحيحهما إلى حدّ بعيد بوساطة العدسات؛ إما باستعمال النظارات أو العدسات اللاصقة.

تطبيق الفيزياء
العدسات المصحّحة

قصر النّظر

في حالة **قصر النّظر**، أو الميوبيا (الحَسَر)، تستطيع العين التّركيز على الأجسام القريبة فقط. إنّ النّقطة البعيدة ليست اللانهاية، بل هي مسافة ما أقصر، وكذلك لا ترى الأجسام البعيدة بوضوح. ويعزى ذلك إلى أنّ كرة العين تكون طويلة كثيرًا، وفي بعض الأحيان يكون انحناء القرنية كبيرًا. وفي أيّ من الحالتين، تتكون أخيلة الأجسام البعيدة أمام الشّبكيّة كعدسة مفرّقة؛ لأنها تسبب ابتعاد الأشعّة المتوازية، وتسمح لها أن تتركز على الشّبكيّة (الشّكل 25-10أ) وبذلك يُصحّح هذا العيب.



الشّكل 25-10 تصحيح عيوب العين بالعدسات. (أ) عين حسيرة (قصيرة النّظر)، لا تركز على الأجسام البعيدة، وتُصَحّح باستعمال عدسة مفرّقة. (ب) عين طويلة النّظر، لا تركز على الأجسام القريبة بوضوح، وتُصَحَّحُ بعدسات مجمّعة.

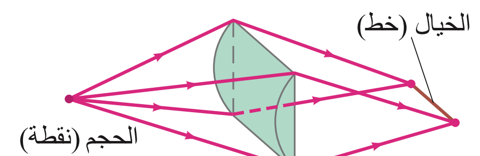
طول النّظر (مَدّ البصر)

أمّا في حالة **طول النّظر**، فإنّ العين لا تستطيع التّركيز على الأجسام القريبة. وعلى الرّغم من أنّ الأجسام البعيدة تُرى عادة بوضوح، فإنّ النّقطة القريبة تكون أبعد بعض الشيء من "الطبيعية" 25 cm، مما يجعل المطالعة أصعب. ينتج هذا العيب عادة من عين بيضوية قصيرة العمق أو (أحيانًا) عدم تحدّب كاف للقرنية. ويتم تصحيح هذا العيب باستعمال عدسة مجمّعة (لامّة). (الشّكل 25-10 ب)، يشبه بصر الشيخوخة طول النّظر الذي يُعزى إلى نقص القدرة على تكيّف العين عندما يتقدّم الفرد في السّن، وتتحرك النّقطة القريبة بعيدًا. لذا، فإنّ العدسات اللامّة تعدّل هذا العيب أيضًا.

اللانقطيّة،

تنتج **اللانقطيّة** عادةً من قرنية غير كروية، أو من العدسة بحيث تتركز الأجسام النقطيّة كخطوط قصيرة، مما يشوّه الخيال، وتكون كما لو أنّ القرنية كروية، ولكن بجزء أسطواني مركب عليها. كما هو مبين في (الشّكل 25-11)، فإنّ عدسة أسطوانية تركز نقطة بصورة خطّ موازٍ لمحورها. العين اللانقطيّة قد تجمع الأشعّة من مستوى واحد، مثل المستوى العموديّ، على بعد أصغر من الأشعّة في المستوى الأفقيّ. تُصحَّح اللانقطيّة، باستعمال عدسة أسطوانية معدّلة. العدسات المستعملة لقصر النّظر أو طوله، أو اللانقطيّة، تقطع عادة بسطوح متراكمة كروية وأسطوانة، كذلك يكون نصف قطر التكور للعدسة المصححة مختلفًا في المستويات المختلفة.

الشّكل 25-11 عدسة أسطوانية تكوّن خيالا خطيّا لجسم نقطيّ لأنها تجمع في مستوى واحد فقط.



المثال 5-25 العين طويلة النّظر

تعاني سهى من طول النّظر بأقرب نقطة للرؤية الواضحة 100 cm. ما قدرة العدسات المطلوبة كي تتمكن من قراءة الصحف الإخبارية عن بعد 25 cm؟ افرض أنّ العدسة قريبة من العين.

النّهج: عند وضع الجسم على بعد 25 cm من العدسة، يجب أن يكون الخيال على بعد 100 cm في الجانب نفسه من العدسة (بحيث يمكن للعين رؤيته)، وبذلك يكون الخيال وهميًّا، (الشّكل 25-12)، و $d_i = -100$ cm سيكون سالبًا. نستعمل معادلة العدسة الرقيقة (المعادلة 23-8) لتحديد البعد البؤريّ اللازم. وصفات المختصين بالإبصار تحدّد قدرة العدسة (المعادلة 23-7 $P = 1/f$) وتعطى بـ الديوبتر ($1\text{ D} = 1\text{ m}^{-1}$).

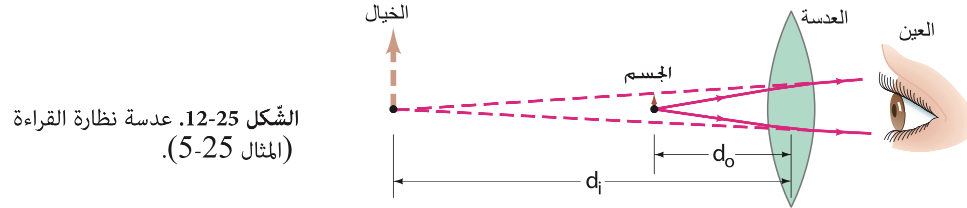
الحلّ: نعرف $d_o = 25$ cm، و $d_i = -100$ cm. معادلة العدسة الرقيقة تعطي

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{25\text{ cm}} + \frac{1}{-100\text{ cm}} = \frac{4-1}{100\text{ cm}} = \frac{1}{33\text{ cm}}$$

لذلك، فإنّ $f = 33\text{ cm} = 0.33\text{ m}$. قدرة العدسة $P = 1/f = +3.0\text{ D}$.

تعني الإشارة الموجبة أنّ العدسة مُجمِّعة.

ملحوظة: نختار موضع الخيال بحيث تستطيع العين مشاهدته. تحتاج العدسة إلى وضع الخيال هناك مع العلم بموقع الجسم (الصحيفة).



الشّكل 25-12. عدسة نظارة القراءة (المثال 5-25).

المثال 6-25 العين الحسيرة (قصيرة النّظر)

عين شخص حسيرة. أقرب نقطة إليها وأبعد نقطة عنها هما 12 cm و 17 cm على الترتيب. (أ) ما قدرة العدسة اللازمة لهذا الشخص كي يرى الأجسام البعيدة بوضوح؟ (ب) ماذا ستكون عندها أقرب نقطة؟ افرض أنّ العدسة على بعد 2.0 cm من العين.

النّهج: لجسم بعيد ($d_o = \infty$)، يجب أن تضع العدسة الخيال عند النّقطة البعيدة للعين كما يبين (الشّكل 25-13 أ)، 17 cm أمام العدسة. يمكننا استعمال معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد البعد البؤريّ لها، ثم نجد قدرتها. يمكن حساب النّقطة القريبة الجديدة (كما يبين الشّكل 25-13ب)، باستعمال معادلة العدسة الرقيقة مرة أخرى.

الحلّ: (أ) لجسم في اللانهاية ($d_o = \infty$)، يجب أن يكون الخيال أمام العدسة، وعلى بعد 17 cm من العين أو $(17\text{ cm} - 2\text{ cm}) = 15\text{ cm}$ من العدسة. وبالتالي، $d_i = -15$ cm. ونستعمل معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد البعد البؤريّ اللازم للعدسة.

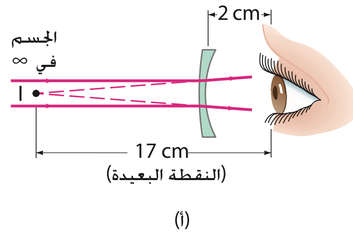
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-15\text{ cm}} = -\frac{1}{15\text{ cm}}$$

ولذلك، فإنّ $f = -15\text{ cm} = -0.15\text{ m}$. وعليه، فإنّ $P = 1/f = -6.7\text{ D}$. تعني الإشارة السالبة أنّ العدسة يجب أن تكون مفرّقة للعدسة الحسيرة. (ب) النّقطة القريبة عند استعمال النظارات هي مكان وضع الجسم (d_o). تكوّن العدسة خيالا عن "النّقطة القريبة للعين المجرّدة"، أي 12 cm من العين. مكان الخيال هو $(12\text{ cm} - 2\text{ cm}) = 10\text{ cm}$ أمام العدسة. لذا، فإنّ $d_i = -0.10$ m. ومعادلة العدسة الرقيقة تعطينا

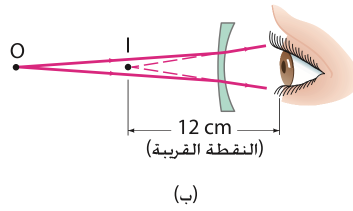
$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{0.15\text{ m}} + \frac{1}{0.10\text{ m}} = \frac{-2+3}{0.30\text{ m}} = \frac{1}{0.30\text{ m}}$$

أي أنّ $d_o = 30$ cm، والذي يعني أنّ أقرب نقطة للرؤية الواضحة بوجود النظارات هي 30 cm أمام العدسة أو 32 cm من العين.

الشّكل 25-13. المثال 6-25.



(أ)



(ب)

العدسات اللاصقة

افرض أنّ عدسات لاصقة استخدمت في (المثال 6-25). بما أنّ العدسات اللاصقة توضع مباشرة على القرنية. لذا، علينا أن نطرح 2.0 cm من مسافات الخيالات.

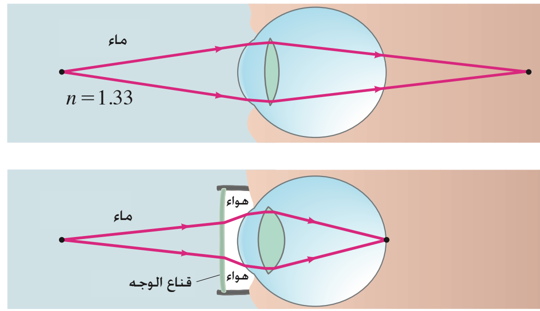
أي أنّه للجسم البعيد $d_i = f = -17\ \text{cm}$. وبالتالي $P = 1/f = -5.9\ \text{D}$. النّقطة القريبة سوف تكون 41 cm وعليه، نرى أنّ العدسات اللاصقة وعدسات النظارة سوف تتطلّب اختلافًا طفيفًا في القدرة أو البعد البؤريّ للعين نفسها نظرًا لاختلاف مواقعها من العين. ونرى أيضًا أنّ عدسات النظارة تعطي نقطة قريبة أفضل من العدسات اللاصقة.

تمرين B: ما قدرة العدسة اللاصقة اللازمة لعين كي ترى الأجسام البعيدة إذا كانت النّقطة البعيدة لها 25 cm؟

الرؤية (الإبصار) تحت الماء

تطبيق الفيزياء
الإبصار تحت الماء

عندما تكون عيناك تحت الماء، لا تظهر الأجسام البعيدة تحت الماء بوضوح؛ لأنّ الفرقَ في معاملي الانكسار عند السّطح الفاصل بين القرنية والماء قليلٌ جدّا: $n = 1.33$ للماء، 1.376 للقرنية. لذلك تنحني الأشعّة قليلا، وتتجمع بعيدًا خلف الشّبكيّة.
(الشّكل 25-14أ). ولكن، إذا استعملت نظارات واقية أو قناعًا للوجه، فإنّك تحتفظ بسطح فاصل بين الهواء والقرنية($n = 1.0$، $n = 1.376$ نسبيّا). وبذلك، يمكن تجميع الأشعّة. (الشّكل 25-14ب)

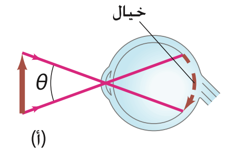


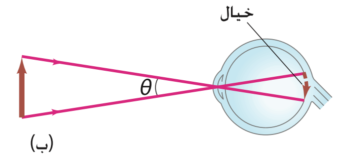
الشّكل 25-14.
(أ) تحت الماء، نرى خيالاً غير واضح؛ لأنّ الأشعّة تنكسر قليلا جدّا من الهواء. (ب) إذا استعملنا نظارات واقية فسيكون لدينا سطح فاصل بين الهواء والقرنية، وعندئذٍ نرى بوضوح.

3-25 العدسة المكبّرة

كثير من الجزء المتبقي من هذا الفصل سيتناول أدوات (أجهزة) ضوئية تستعمل للحصول على أخيلة مكبرة للأشياء. نناقش أولا **المكبّر البسيط**، أو **العدسة المكبّرة**، وهي ببساطة عدسة مُجمِّعة (انظر صورة افتتاحية الفصل).

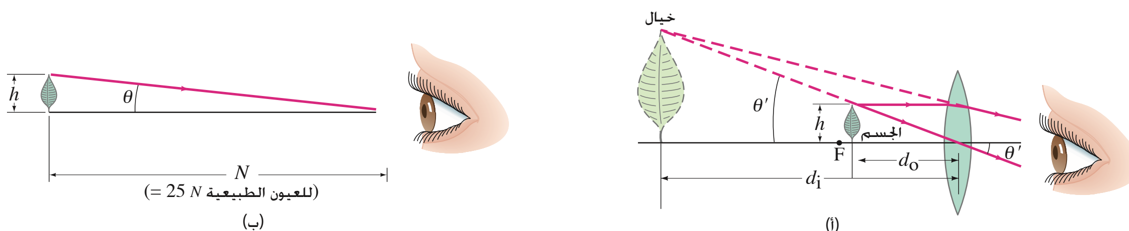
كم سيبدو الجسم كبيرًا، وكم من التفاصيل سوف نرى عليه، يعتمد على حجم الخيال الذي يتكوّن على الشّبكيّة. وهذا بدوره يعتمد على الزّاوية التي يقابلها الجسم عند العين. فمثلا، لو أخذنا قطعة نقود معدنية على بعد 30 cm من العين، فإنّ طولها يبدو ضعفي طولها لو كانت على بعد 60 cm ؛ لأنّ الزّاوية التي تقابلها ضعفها أيضًا (الشّكل 25-15). وعندما نريد فحص التفاصيل في جسم ما، فإننا نضع الجسم قريبًا من العين بحيث يقابل زاوية كبيرة. ولكن باستطاعة أعيننا التّكيّف إلى حدّ ما (النّقطة القريبة). وسوف نفرض المسافة العيارية $N = 25\ \text{cm}$ كنقطة قريبة فيما يتبع. إنّ العدسة المكبّرة تسمح لنا بوضع الجسم أقرب إلى العين، وبالتالي يقابل زاوية أكبر. وكما يبين (الشّكل 25-16أ)، يوضع الجسم في البؤرة أو أقرب منها قليلا. عندها تنتج العدسة المجمعة خيالاً وهميًّا، والذي يجب أن يكون على بعد 25 cm من العين على الأقلّ إذا كان عليها رؤيته. أمّا إذا كانت العين مرتخية، فسيكون الخيال في اللانهاية، في حين يكون الجسم في البؤرة تمامًا. (هذا ما تقوم به تمامًا عندما "تركّز" النّظر على الجسم عندما تحرك العدسة المكبّرة.)





الشّكل 25-15 عند النّظر إلى الجسم نفسه عند مسافة أقرب، يكون الخيال على الشّبكيّة أكبر، ولذلك يبدو الجسم أكبر، وعندئذٍ يمكن رؤية تفاصيل أكثر. الزّاوية θ التي يقابلها الجسم في (أ) أكبر من تلك التي في (ب) ملحوظة: ليس هذا تخطيط طبيعي؛ لأننا نبين شعاعًا واحدًا فقط من كلّ نقطة.

الشّكل 25-16. انظر إلى الورقة (أ) خلال عدسة مكبرة. (ب) بالعين المجردة. تعدّل العين النّظر إلى النّقطة في الحالتين.



مقارنة الجزء (أ) بالجزء (ب) من (الشّكل 25-16)، حيث ينظر إلى الجسم نفسه عند النّقطة القريبة بالعين المجردة. وهذا يكشف أنّ الزّاوية التي يقابلها الجسم عند العين أكبر بكثير عند استعمال العدسة المكبّرة. **التكبير الزاوي** أو **قدرة التكبير** M للعدسة تعرف بخارج قسمة الزّاوية التي يقابلها الجسم مع استعمال العدسة على الزّاوية التي يقابلها الجسم بالعين المجرّدة، عندما يكون الجسم عند النّقطة القريبة N للعين

($N = 25$ cm للعين الطبيعية):

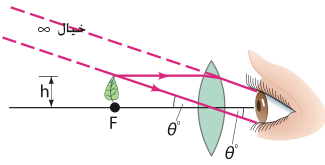
$$M = \frac{\theta'}{\theta} \qquad \textbf{(25-1)}$$

نفرض الزوايا صغيرة، ولذلك (بالراديان) $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$

حيث θ، θ' المبيّنة في (الشّكل 25-16). يمكن كتابة M بدلالة البعد البؤريّ عند ملاحظة أنّ $\theta = h/N$ (الشّكل 25-16ب)، و $\theta' = h/d_o$ (الشّكل 25-16أ)، حيث h هو ارتفاع الجسم. ونفرض أنّ الزاويتين صغيرتان، وبذلك تكون الزاويتان θ، θ' مساويتين لجيبهما أو ظلّهما. إذا كانت العين مرتخية، فسيكون الخيال في اللانهاية، ويكون الجسم في البؤرة تمامًا؛ انظر إلى (الشّكل 25-17). وبالتالي، $d_o = f$، و $\theta' = h/f$. وهكذا

تكبير المكبر البسيط.

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/f}{h/N} = \frac{N}{f} \qquad [\text{العين تركز على } \infty\text{؛ للعين } N = 25\text{ cm}] \qquad \textbf{(25-2أ)}$$



الشّكل 25-17 والعين في حالة ارتخاء، يوضع الجسم في البؤرة، والخيال في اللانهاية. قارن مع (الشّكل 25-16أ) حيث الخيال عند النّقطة القريبة للعين.

ونرى أنّه كلّما كان البعد البؤريّ للعدسة أصغر، كان التكبير أكبر.*

يمكن زيادة التكبير لعدسة ما قليلًا بتحريك العدسة، وتكيف العين بحيث تركز النّظر على الخيال عند النّقطة القريبة للعين. في هذه الحالة، $d_i = -N$ (انظر الشّكل 25-16أ) إذا كانت العين قريبة من المكبّر. عندها تُعطى مسافة الجسم d_o بـ

$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} + \frac{1}{N}$$

نرى من هذه المعادلة أنّ $d_o = fN/(f+N) < f$، كما هو مبيّن في (الشّكل 25-16أ)، لأنّ $N/(f+N)$ يجب أن تكون أقلّ من واحد. وباعتبار $\theta' = h/d_o$ يكون التكبير

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/d_o}{h/N} = \frac{N}{d_o} = N\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{N}\right)$$

أو

$$M = \frac{N}{f} + 1 \qquad [\text{العين مركزة على } \textbf{النقطة القريبة}\text{، } N\text{، } N = 25\text{ cm}] \qquad \textbf{(25-2ب)}$$

نرى أنّ التكبير أكبر بقليلٍ عندما تركز العين على نقطتها القريبة وليست مرتخية.

المثال 25-7 قرّب عدسة (الجواهري)

عدسة مجمعة بعدها البؤريّ 8-cm تستعمل كعدسة جواهري، وهي عدسة مكبرة. جدْ بالتقريب: (أ) التكبير عندما تكون العين في حالة ارتخاء، (ب) التكبير إذا تمّ تركيز العين على نقطتها القريبة $N = 25$ cm.

النّهج: يعطى التكبير عندما ترتخي العين (بالمعادلة 25-2أ). وعند تركيز العين على النّقطة القريبة، نستعمل (المعادلة 25-2ب)، ونفرض أنّ العدسة قريبة من العين.

الحلّ: (أ) عند تركيز العين المرتخية على اللانهاية

$$M = \frac{N}{f} = \frac{25\text{ cm}}{8\text{ cm}} \approx 3\times$$

(ب) التكبير عندما تركز العين على نقطتها القريبة ($N = 25$ cm)، والعدسة قريبة من العين، هو

$$M = 1 + \frac{N}{f} = 1 + \frac{25}{8} \approx 4\times$$

* مكبرات العدسة المنفردة البسيطة محدودة بـ 2 أو 3× أضعاف بسبب التشويه النّاتج من الزّيغ الكرويّ (البند 25-6).

4-25 التلسكوبات

يستخدم التّلسكوب لتكبير الأجسام البعيدة جدًّا. في معظم الحالات، يمكن اعتبار الجسم موجودًا في اللانهاية.

وعلى الرّغم من أنّ جاليليو لم يكتشف التلسكوب[*]، إلا أنّه طوَّره، وأصبح آلةً مفيدةً ومستعملةً بكثرة. إضافة إلى أنّه أول من تفحَّص السموات به (الشّكل 25-18)، وتوصَّل به إلى اكتشافات هزّت العالم مثل: أقمار المشتري، وأطوار الزهرة، والبقع الشّمسيّة، وتركيب سطح القمر. كما اكتشف أنّ درب التبّانة مكوَّن من عدد هائل من النجوم المنفردة، وغير ذلك.

هناك عدة أنواع من **التلسكوبات الفلكية**، منها النوع الكاسر (من الانكسار) الدارج الذي يدعى أحيانًا بـ **الكبلري (Keplerian)**. ويحتوي هذا النوع عدستين لامتين مثبتتين عند أنبوب طويل، كما في (الشّكل 25-19). تسمّى العدسةُ القريبةُ من الجسم **العدسة الشّيئيّة** (بعدها البؤريّ f_o) وتكوّن خيالًا حقيقيًّا I_1 للجسم البعيد في مستواها البؤريّ (بعدها البؤريّ F_o) (أو قريبًا منها إن لم يكن الجسم في اللانهاية). وعلى الرّغم من أنّ هذا الخيال I_1 أصغر من الجسم الأصلي، فإنّه يقابل زاوية أكبر، وقريب جدًّا من العدسة الثانية التي تُسمّى **العينيّة** (بعدها البؤريّ f_e)، والتي تعمل مكبرًا. أي أنّ العينيّة تُكبِّر الخيال الناتج من الشّيئيّة ليُنتج خيال مكبر، I_2، يكون وهميًّا ومقلوبًا. إذا كانت عين الناظر مرتخية، فإنّ العينيّة تُضبطُ بحيث يتكون I_2 في اللانهاية. عندئذٍ، يكون الخيال الحقيقيّ I_1 عند البؤرة F'_e للعينية، والبعد بين العدسيتين هو $f_o + f_e$ لجسم في اللانهاية. ولحساب التكبير الكلّيّ لهذا التلسكوب، نلاحظ أنّ الزّاوية التي يقابلها الجسم عند النّظر إليه بالعين المجردة هي الزّاوية θ التي يقابلها الجسم عند الشّيئيّة. ومن (الشّكل 25-19)، نستطيع رؤية أنّ $\theta \approx h/f_o$، حيث h هو طول الخيال I_1، ونفرض أنّ الزّاوية θ صغيرة بحيث $\tan\theta \approx \theta$. لاحظ أيضًا أنّ أسمك شعاع مرسوم في (الشّكل 25-19) موازٍ للمحور قبل أن يصطدم بالعينيّة، ولذلك ينكسر مارًّا ببؤرة العدسة العينيّة F_e عند الطرف البعيد. وهكذا $\theta' \approx h/f_e$.
وقوة التكبير الكلية (التكبير الزاوي) لهذا التلسكوب هي

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{(h/f_e)}{(h/f_o)} = -\frac{f_o}{f_e} \tag{3-25}$$

حيث أدخلنا إشارة سالبة لتعني أنّ الخيال مقلوب. ولتحقيق تكبير كبير؛ يجب أن يكون البعدُ البؤريّ للشيئية كبيرًا وللعينية صغيرًا.

[*] أنجز جاليليو تلسكوبه الأول عام 1609 بعد أن سمع بوجوده في هولندا. لقد كان تكبير أول تلسكوب ثلاث مرات أو أربع. لكن جاليليو سرعان ما صنع تلسكوبًا قوة تكبيره 30 مرة. ويعود أول تلسكوب هولندي إلى عام 1604. على الرّغم من وجود مرجع يذكر أنّه كان نسخة عن تلسكوب إيطالي صُنع في عام 1590. لقد أعطى كيبلر (انظر الفصل الخامس) وصفا شعاعيًا (في 1611) لتلسكوب كيبلر الذي سمّي نسبة له، حيث وصفه، ولكنه لم يقم بصنعه.



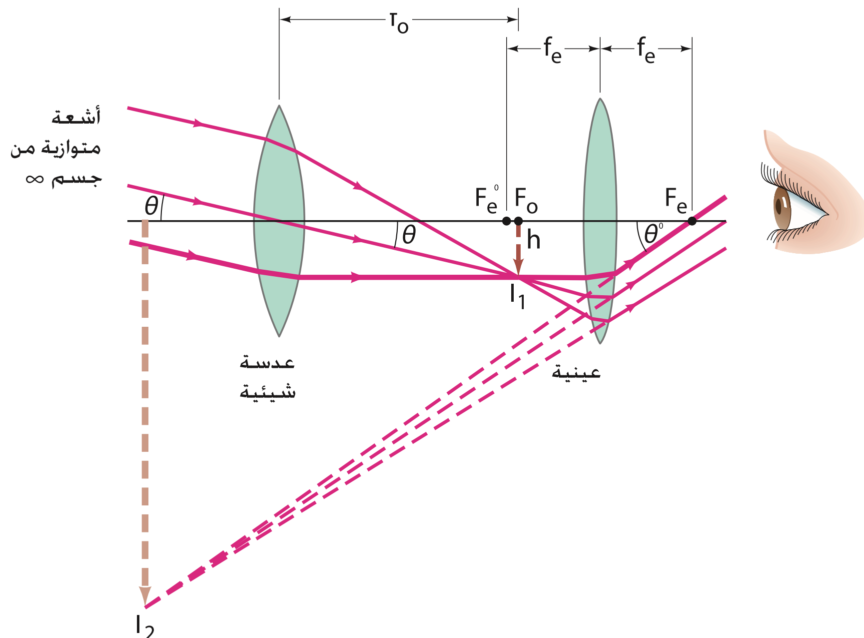
(أ)



(ب)

الشّكل 25-18 (أ) العدسة الشّيئيّة (مثبتة الآن في إطار عاجيّ) حقق جاليليو بوساطته اكتشافات هزت العالم، من ضمنها أقمار المشتري. (ب) التلسكوبات اللاحقة التي صنعها جاليليو.

تكبير المنظار



الشّكل 25-19. التلسكوب (الكاسر). ضوء متواز من نقطة على جسم بعيد ($d_o = \infty$) نتج في بؤرة العدسة الشّيئيّة. هذا الخيال (I_1) يكبر عن طريق العدسة العينيّة ليكون الخيال النهائي I_2. هناك شعاعان فقط يظهران في دخولهما للشيئية هما الشّعاعان العياريان (2 و3) في (الشّكل 23-34).

المثال 25-8 تكبير التّلسكوب

أضخم تلسكوب كاسر ضوئيّ في العالم موجود في مرصد يركيس في وسكنسون. (الشّكل 25-20). وهو منظار الـ (40-inch). أي أنّ قطر الشّيئيّة 40 in أو 102 cm. البعد البؤريّ للشيئية هو 19 m. والبعد البؤريّ للعينية 10 cm. احسب: (أ) قوة التكبير الكلية لهذا التلسكوب. (ب) طول هذا التلسكوب على نحو تقريبي.

النّهج: (المعادلة 25-3) تعطي التكبير. طول المنظار هو البعد بين العدستين.

الحلّ: (أ) من (المعادلة 25-3) نجد أنّ

$$M = -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{19\text{ m}}{0.10\text{ m}} = -190\times$$

(ب) للعين المرتخية، الخيال I_1 عند البؤرة لكلتا العدستين العينيّة والشّيئيّة. وهكذا تكون المسافة بين العدستين $f_o + f_e \approx 19\text{ m}$، وهي طول التلسكوب بصورة أساسية.



الشّكل 25-20 صُنع هذا التلسكوب الكاسر الكبير في عام 1897 في مرصد يركيس في وسكنسون. العدسة الشّيئيّة قطرها 102 cm (40 inches) وأنبوب المنظار طوله نحو 19 m. (مثال 25-8).

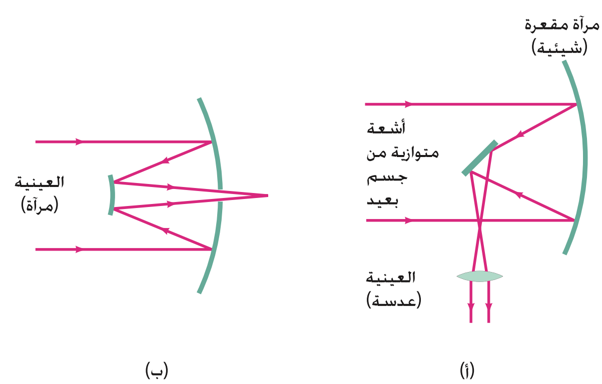
تمرين C: تلسكوب قوة تكبيره $40\times$، البعد البؤريّ للعينية 1.2-cm. ما البعد البؤريّ للعدسة الشّيئيّة؟

التلسكوبات العاكسة

كي تنتج للتلسكوب الفلكي أخيلة واضحة للنجوم البعيدة، يجب أن تكون العدسة الشّيئيّة واسعة لتسمح بدخول أكبر كمية ممكنة من الضّوء. في الواقع، إنَّ قطرَ العدسة الشّيئيّة (وبالتالي قدرتها على تجميع الأشعّة) عاملٌ مهمٌّ في التلسكوب الفلكي. ولهذا، تُسَمّى التلسكوبات الكبيرة استنادًا إلى قطر الشّيئيّة فيها (مثل تلسكوب كيك ذي الـ 10-meter في هاواي). إنّ بناء العدسات الكبيرة وصقلها عملية صعبة جدًا. لذا، فالتلسكوبات الكبيرة هي تلسكوبات عاكسة تستعمل مرآة مقعرة كشيئية. (الشّكل 25-21). المرآة لها سطح واحد بحاجة إلى صقل، ويمكن أن تسند إلى سطحها كلّه† (العدسة الكبيرة، والتي تسند إلى حوافها، قد تتشقق تحت تأثير وزنها). وعادة يمكن إزالة العينيّة (انظر الشّكل 25-21) بحيث يمكن تسجيل الخيال الحقيقي الذي تكونه الشّيئيّة على فيلم أو مِجَسّ CCD (البند 25-1).

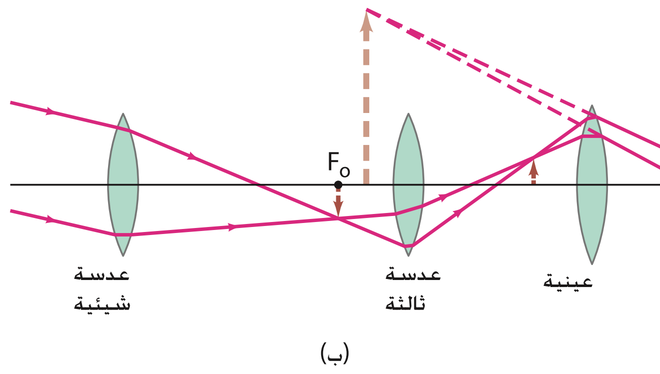
* هناك ميزة أخرى للمرايا وهي أنّها لا تبدي زيغًا لونيًا؛ لأنّ الضّوء لا يمر خلالها. ويمكن صقلها في شكل قطع مكافئ لتعديل الزّيغ الكرويّ. (البند 25-6). ولقد كان العالِم نيوتن أول من اقترح التلسكوب العاكس.

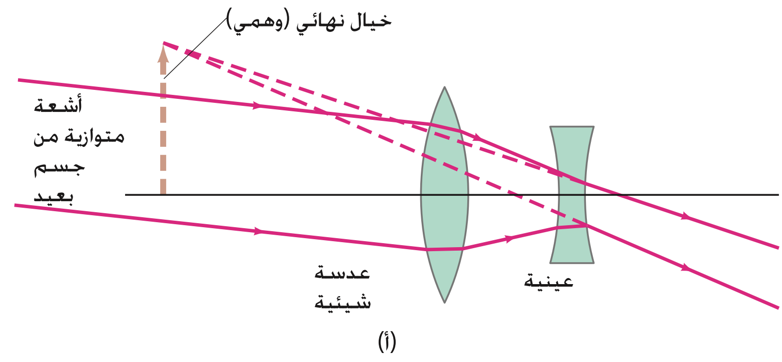
الشّكل 25-21. يمكن استخدام مرآةٍ مقعّرةٍ كشيئيّة للتلسكوب الفلكي. أمّا (أ) عدسة أو (ب) مرآة يمكن استعمالها كعينيّة. الترتيب (أ) يُدعى ترتيب نيوتن. (ب) ترتيب كاسغراني. وهناك ترتيبات أخرى ممكنة. (ج) تلسكوب هالي ذو الـ 200-inch (قطر المرآة) على جبل بالومار في كاليفورنيا. (د) تلسكوب كيك ذو الـ 10-meter في هاواي. وهذا التلسكوب يجمع 36 مرآة 1.8-meter ذات 6 جوانب في عاكس واحد كبير قطره 10 m.




(ج)


(د)





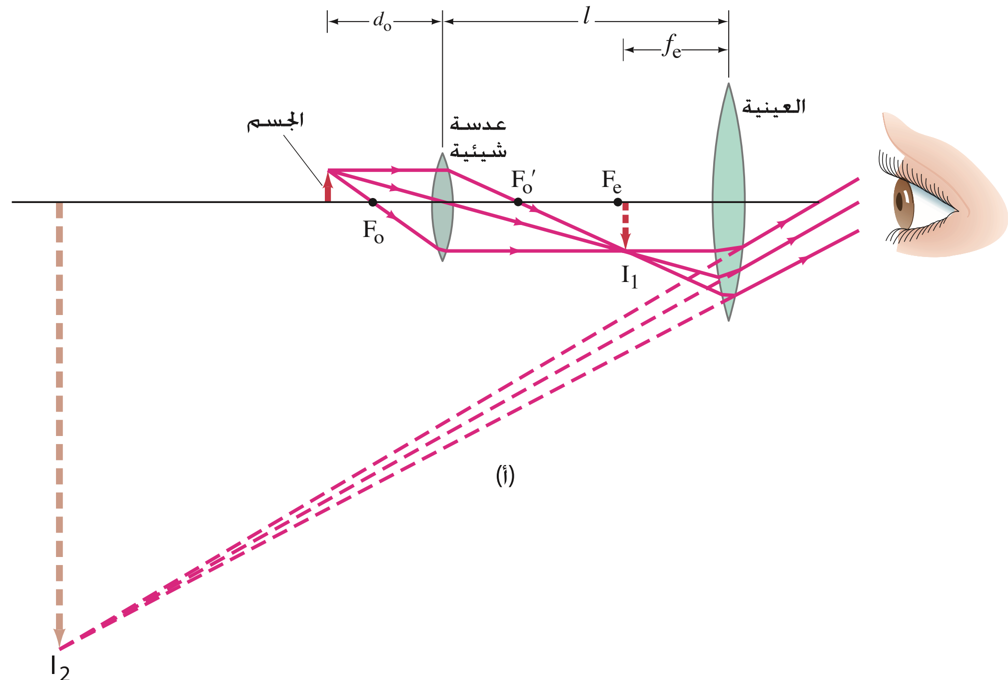
الشّكل 25-22. التلسكوبات الفلكية التي تنتج خيالا معتدلا: (أ) جاليلي؛ (ب) نظارة جاسوس أو عدسة الحقل.

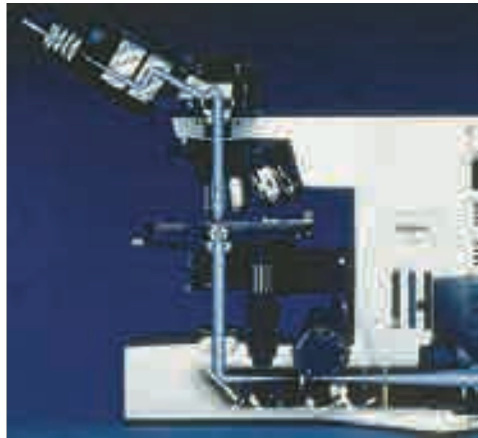
إنّ **التلسكوب الفلكي** لرؤية الأجسام على الأرض، يجب أن يزوّدنا بخيالٍ معتدل؛ رؤية الأجسام العادية مقلوبة سيكون صعبًا. (أقلّ أهمية لمراقبة النجوم). هناك تصميمانِ في (الشّكل 25-22) هما: 1- **جاليلي**، الذي استعمله جاليليو لاكتشافاته الفلكية الكبيرة، وله عدسة مفرّقة كعدسة عينية تعترض الأشعّة المتجمعة من العدسة الشّيئيّة قبل أن تصل نقطة التجمع، وتعمل للحصول على خيال وهميّ معتدل. (الشّكل 25-22). هذا التصميم يستخدم عادة في نظارات المسارح، حيث يكون الأنبوب فيه صغيرًا، ومجال الرؤية يكون صغيرًا أيضًا. 2- التّصميم المبين في (الشّكل 25-22 ب)، الذي يُسَمّى عادةً **نظارات الجواسيس**. وهذا النوع يستعمل عدسة ثالثة محدّبة تعمل كي يكون الخيال معتدلا. ويجب أن تكون نظارة الجاسوس فيه طويلة. أمّا أكثر تصميم عملي في هذه الأيام فهو التلسكوب الثنائي ذو المنشور المبيّن في (الشّكل 23-26). الشّيئيّة والعينيّة فيه عدستان مجمعتان. تعكس المناشير الأشعّة الضّوئيّة بوساطة الانعكاس الداخلي الكلي، ويقلّل الحجم الفيزيائي للتلسكوب، ويؤدي إلى الحصول على خيال معتدل. أحد المنشورين يعيد قلب الخيال في المستوى العموديّ، والآخر في المستوى الأفقي.

* 5-25 المجهر المركّب

تطبيق الفيزياء
المجاهر.

المجهر المركّب **كالتلسكوب**، له عدسة شيئية وأخرى عينية، (الشّكل 25-23). أمّا تصميمه فيختلف عن تصميم التلسكوب؛ لأنّ المجهر يُستعمل لمشاهدة الأجسام القريبة جدًّا، لذلك يكون بعد الجسم صغيرًا جدًا. يوضع الجسم قليلًا خارج البؤرة للشيئية كما في (الشّكل 25-23 أ). الخيال I_1 الذي تكونه الشّيئيّة حقيقيّ وبعيد عن العدسة بصورة كافية، ومكبر كثيرًا. يكبّر هذا الخيال بوساطة العينيّة إلى خيال وهميّ كبير جدًّا، I_2، حيث يرى بالعين مقلوبًا.




(ب)

الشّكل 25-23. المجهر المركّب: (أ) مخطط شعاعيّ.
(ب) صورة (الإضاءة تأتي من أسفل اليمين، ثم إلى الأعلى خلال الشّريحة التي تحتوي الجسم).

التكبير الكلّيّ للمجهر هو حاصل ضرب التكبيرين الناجّين من العدستين. الخيال I_1 الذي ينتج من الشّيئيّة هو بمعامل m_o أكبر من الجسم نفسه. ومن (الشّكل 25-23أ) و (المعادلة 23-9) لتكبير عدسة بسيطة، نجد أنّ

$$m_o = \frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} = \frac{l - f_e}{d_o} \qquad \textbf{(25-4)}$$

حيث d_o، d_i هما بعدًا الجسم والخيال عن العدسة الشّيئيّة. أمّا l فهي المسافة بين العدستين (يساوي طول أنبوبة الجهر). وأهملنا إشارة السالب في (المعادلة 23-9) التي تشير فقط إلى أنّ الخيال مقلوب. نضع $d_i = l - f_e$، وهذا صحيح فقط إذا كانت العين مرتخية، بحيث إنّ الخيال I_1 موجود عند البؤرة F_e للعينية. تعمل العينيّة عمل الجهر البسيط. وإذا فرضنا أنّ العين مرتخية، فإنّ التكبير الزاوي للعينية M_e يكون (من المعادلة 25-2أ).

$$M_e = \frac{N}{f_e} \qquad \textbf{(5-25)}$$

حيث $N = 25\text{ cm}$ هي النّقطة القريبة للعين الطبيعية. وبما أنّ العينيّة تضخّم الخيال الناتج من الشّيئيّة، فإنّ التكبير الزاوي M هو حاصل ضرب التكبير الخطي للشيئية، m_o، في التكبير الزاوي، M_e، للعدسة العينيّة (المعادلتان 25-4، و 25-5):

التّكبير في المجهر

$$M = M_e m_o = \left(\frac{N}{f_e}\right)\left(\frac{l - f_e}{d_o}\right) \qquad \textbf{(25-6أ)}$$

$$\approx \frac{Nl}{f_e f_o} \qquad [f_o \text{ and } f_e \ll l] \qquad \textbf{(25-6ب)}$$

يكون التقريب في (المعادلة 25-6 ب) دقيقًا عندما يكون f_e و f_o صغيرين بالنسبة إلى l. ولذلك، $l - f_e \approx l$ و $d_o \approx f_o$ (الشّكل 25-23أ). هذا تقريب جيّد في التكبيرات الكبيرة، والتي تعمل عندما يكون f_o، و f_e صغيرين جدّا (في مقام المعادلة 25-6 ب). ولعمل عدسات ذات بعد بؤري صغير تعمل جيدًا كعدسة شيئية، أي عدسات مركبة تحتوي على عدة عناصر؛ يجب استعمالها كي نتجنب الزّيغ الحقيقي، كما سيناقش في البند التالي.

المثال 25-9 تكبير التّلسكوب

يتكون الجهر المركّب من عينية $10\times$ وشيئية $50\times$، البعد بينهما 17.0 cm. احسب: (أ) التكبير الكلّيّ. (ب) البعد البؤريّ لكلّ عدسة. (ج) موقع الجسم عندما يكون الخيال في البؤرة إذا كانت العين مرتخية. افترض عينًا طبيعية. ولذلك، $N = 25\text{ cm}$.

النّهج: التكبير الكلّيّ هو حاصل ضرب تكبير العينيّة في تكبير الشّيئيّة. البعد البؤريّ للعينية يمكن إيجاده من (المعادلة 25-2أ، أو المعادلة 25-5)، لتكبير مجهر بسيط. أمّا للعدسة الشّيئيّة، فمن الأسهل إيجاد d_o (الفرع ج) باستعمل (المعادلة 25-4) قبل أن نجد f_o.

الحلّ: (أ) التكبير الكلّيّ هو $(10\times)(50\times) = 500\times$.

(ب) البعد البؤريّ للعينية هو (المعادلة 25 - 5) $f_e = N/M_e = 25\text{ cm}/10 = 2.5\text{ cm}$

ثم نحل (المعادلة 25-4) لإيجاد قيمة d_o ثم نجد

$$d_o = \frac{l - f_e}{m_o} = \frac{(17.0\text{ cm} - 2.5\text{ cm})}{50} = 0.29\text{ cm}$$

من معادلة العدسة الرقيقة للشيئية مع $d_i = l - f_e = 14.5\text{ cm}$ (انظر الشّكل 25-23أ)

$$\frac{1}{f_o} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{0.29\text{ cm}} + \frac{1}{14.5\text{ cm}} = 3.52\text{ cm}^{-1}$$

لذلك، $f_o = 1/(3.52\text{ cm}^{-1}) = 0.28\text{ cm}$

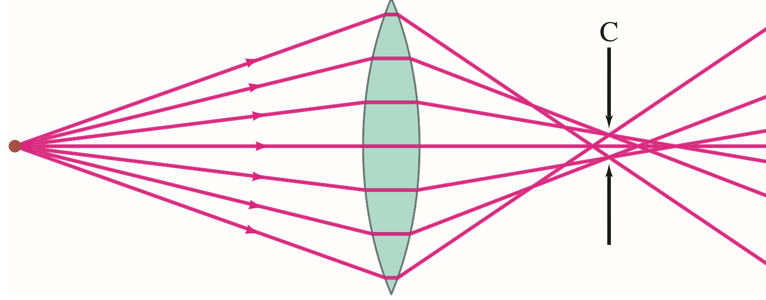
(ج) لقد حسبنا $d_o = 0.29\text{ cm}$، وهو قريب جدّا من f_o.

* 6-25 عيوب العدسات والمرايا

طوّرنا في (الفصل 23) نظرية تكوين الأخيلة بوساطة عدسة رقيقة. فوجدنا، على سبيل المثال، أنّ الأشعّة كلّها من نقطة واحدة على جسمٍ ما سوف تتجمع في نقطةٍ واحدةٍ كنقطة خيال. تعتمد هذه النّتيجة ونتائج أخرى على بعض التقريبات، كصنع الأشعّة جميعها زوايا صغيرة فيما بينها، ونستطيع استعمال $\sin\theta \approx \theta$. وبسبب هذه التقريبات، نتوقع انحرافات عن النّظرية البسيطة، بما يدعى **عيوب العدسات**. هناك أنواع مختلفة من العيوب، وسنناقش كلّ واحد منها على انفراد، ولكن يمكن تقديمها في الوقت نفسه.

افترض جسمًا عند أيّ نقطة (حتى في اللانهاية) على محور عدسة. تتجمع الأشعّة من هذه النّقطة التي تمر خلال المناطق البعيدة من العدسة في نقطة تختلف عن نقطة تجمع الأشعّة التي تمر في مركز العدسة، وهذا ما يُعرف **بالزّيغ الكرويّ**. وهو مبيّن على نحو مبالغ فيه في (الشّكل 25-24).

الزّيغ الكرويّ



الشّكل 25-24. الزّيغ الكرويّ (بصورة مبالغ فيها). الدائرة أقلّ تشويشًا عند C.

وبالتالي، فإنّ الخيال المرئيّ على قطعة من فيلم (مثلا) سوف لا يكون نقطة، بل دائرة صغيرة من الضّوء. لو وضع الفيلم عند النّقطة C، كما يُشار إليه، فسيكون للدائرة أقلّ قطر، وندعوه بدائرة أقلّ تشويشًا. إنّ الزّيغ الكرويّ موجود طالما نستعمل السّطوح الكرويّة. ويمكن تصحيحها لو استخدمنا سطوحًا غير كروية للعدسة. ومن الجدير بالذكر أنّ قطع مثل هذه السّطوح وصقلها صعب ومكلف. ولكن يمكن تقليل ذلك بالسّطوح الكرويّة باختيار التكورات بحيث تحدث مقادير متساوية من الانحناءات على سطحي العدسة، ويمكن تصميم مثل هذه العدسة لبعد واحد للجسم فقط. إنّ الزّيغ الكرويّ عادة (نعني أننا قللناه إلى حدّ بعيد) باستعمال عدة عدسات كمجموعة، وباستعمال الجزء المركزي فقط من هذه العدسات.

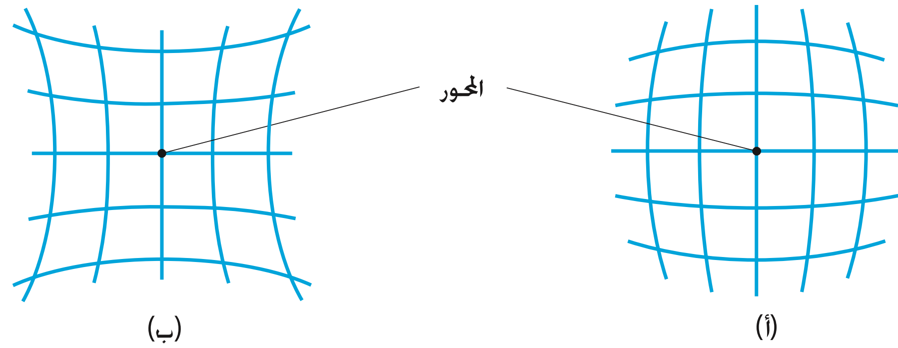
وبالنسبة إلى نقاط غير محورية، تحصل زيغانات إضافية. الأشعّة المارة من مناطق مختلفة من العدسة تسبب انتشارًا للخيال يكون غير دائري. وهناك أثران هما: **زيغ هاليّ** (لأنّ خيال النّقطة يظهر كالنجم المذنب وليس كدائرة) ولا **نقطيّة غير محورية***. علاوة على ذلك، فإنّ نقاط الخيال لأجسام خارج المحور وعلى البعد نفسه من العدسة لا تقع على مستوى منبسط، بل على سطح منحنٍ؛ أي أنّ المستوى البؤريّ غير منبسط. (وهذا هو المتوقع؛ لأنّ النقاط على مستوى منبسط، مثل فيلم في كاميرا، ليست على البعد نفسه من العدسة). ويعرف هذا العيب **بانحناء المجال**. وهو مشكلة في الكاميرات والأدوات الأخرى حيث يوضع الفيلم في مستوى منبسط. وفي العين، على أيّ حال، يعدّل هذا الأثر لأنّ الشّبكيّة فيها منحنية.

زيغانات غير محورية

وهناك عيب آخر يعرف بـ **التّشوّه**، وهو نتيجة اختلاف التكبير عند مسافات مختلفة عن محور العدسة. وهكذا، فإنّ جسما بصورة خط مستقيم على مسافة من محور العدسة يمكن أن يكون خيالا منحنيًا. إنّ شبكة مربعة من الخطوط يمكن أن تتشوه تنتج "تشوّها برميليا" أو "تشوّه مخدة دبوسية" (الشّكل 25-25). وهذا التّشوّه الأخير شائع في العدسات ذات الزّاوية الواسعة.

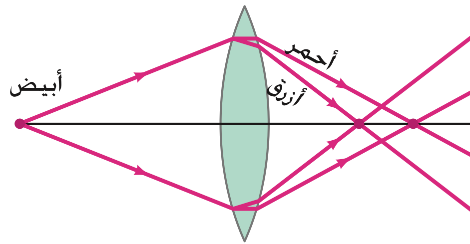
تحدث الزّيغانات السابقة كلّها للضوء وحيد اللون، ولذلك تدعى الزّيغانات وحيدة اللون. الضّوء العادي ليس وحيد اللون، وسوف يكون هناك زيغ لونيّ. يحدث الزّيغ بسبب التحليل اللونيّ — اختلاف معامل انكسار المواد الشفافة مع اختلاف طول الموجة (البند 24-4). فمثلا، ينحني الضّوء الأزرق أكثر من انحناء الضّوء الأحمر بوساطة الزجاج.

* على الرغم من أنّ الأثر هو نفسه مثل اللانقطيّة في العين (البند 25-2)، ولكن السبب مختلف. اللانقطيّة غير المحورية ليست مشكلة في العين؛ لأنّ الأشياء ترى واضحة فقط على النقرة، على محور العدسة.



الشّكل 25-25 التّشوّه: يمكن أن تجد العدسات خيالًا لشبكة من الخطوط المتعامدة لإنتاج (أ) تشوّه برميلي أو (ب) تشوّه مخدة دبوسية. هذه التّشوّهات يمكن رؤيتها في (الشّكل 25-29 د).

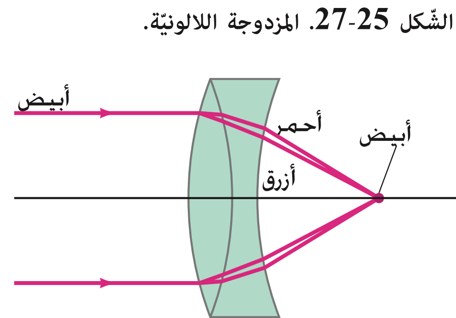
ولذلك، لو سقط ضوءٌ أبيض على عدسة، فإنّ الألوان المختلفة سوف تتجمع في نقاط مختلفة، (الشّكل 25-26)، وسوف يكون هناك هُدُبٌ ملونة في الخيال. الزّيغ اللونيّ يمكن حذفه لأيّ لونين (وينخفض بصورة كبيرة للألوان الأخرى مجتمعة) باستعمال عدستين مصنوعتين من مادتين مختلفتين بمعاملي انكسار مختلفين، وكذلك قدرة تحليل مختلفة. وفي العادة، تكون إحدى العدستين مجمّعة والأخرى مفرّقة، وتلصقان عادة معًا (الشّكل 25-27). ويُسَمّى مثل هذا الجمع للعدسات **مزدوجة لا لونيّة** (أو عدسة مصححة لونيًا).



الشّكل 25-26. الزّيغ اللونيّ تتجمع الألوان المختلفة في نقاط مختلفة.

من غير الممكن تصحيح الزّيغانات كلّها. ولكن يمكن التقليل من أثرهما بجمع عدستين أو أكثر معًا. العدسات ذات الجودة العالية والمستعملة في الكاميرات، والمجاهر، والأدوات الأخرى هي **عدسات مركبة** مكونة من عدة عدسات بسيطة (يرجع لها **كعناصر**). وقد تحتوي عدسة الكاميرا ذات الجودة العالية على 6 إلى 8 عناصر (أو أكثر). وللتبسيط، سنشير إلى العدسات في الأشكال كما لو أنها عدسات بسيطة.

الشّكل 25-27. المزدوجة اللالونيّة.



العين البشرية كذلك عرضة للزيغانات، لكنها قليلة. فالزّيغان الكرويّ مثلًا يكون قليلًا لأنّ: 1- انحناء القرنية يكون عند الأطراف أقلّ ممّا هو عند المركز. 2- كثافة العدسة عند الأطراف أقلّ منها عند المركز. وكلا الأثرين يسبب انحناء الأشعّة عند الأطراف بصورة أقلّ. لذا، يقلّ الزّيغ الكرويّ. أما الزّيغ اللونيّ فيصحح لأنّ العدسة تمتص الموجات القصيرة بصورة ملموسة، والشّبكيّة أقلّ حساسية لموجات الأزرق والبنفسجي. وهذه هي منطقة الطّيف حيث التحليل اللونيّ – وبالتالي الزّيغ اللونيّ – أكبر ما يمكن (الشّكل 24-14).

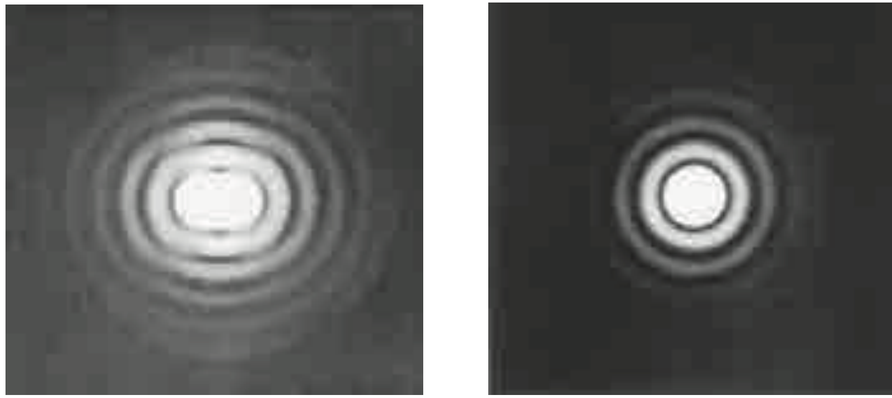
يوجد في المرايا الكرويّة (البند 23-3) كذلك مثل هذه الزّيغانات، ومن ضمنها الزّيغ الكرويّ (انظر الشّكل 23-11). يمكن قطع المرايا بشكل قطع مكافئ لتصحيح هذا الزّيغ، إلّا أنّ تصنيع هذا صعب، ومكلف جدًّا. وهذه المرايا لا تبدي الزّيغ اللونيّ؛ لأنّ الضّوء لا يمرّ خلالها (لا يوجد انكسار ولا تحليل لونيّ).

7-25 حدود التّفريق (التحليل)؛ الفتحات الدائرية

إنّ قدرة العدسة على انتاج خيالين منفصلين لجسم مكوّن من نقطتين قريبتين جدًّا من بعضهما تدعى **التّفريق** (التحليل) للعدسة. كلّما قَرُبَ الخيالان وما زالا منفصلين (وليسا بقعتين متراكبتين) زاد التحليل. ويحدّد تحليل عدسة الكاميرا، مثلًا، بعدد الخطوط لكلّ 1 mm عادة، كما ذكرنا في (البند 25-1).

هناك عاملان يحددان تفريق (تحليل) العدسة: الأول هو عيوبها. كما رأينا، بسبب الزّيغ الكرويّ أو غيره من الزّيغانات، فإنّ الجسم النقطيّ ليس نقطة على الخيال، ولكنه بقعة صغيرة. إنّ التصميم الدقيق للعدسات المركّبة يمكن أن يقلل الزّيغانات بصورة ملموسة، ولكن لا يمكن تصحيحها بصورة كاملة. أما العامل الآخر الذي يحدد التحليل فهو الحيود، والذي لا يمكن تصحيحه ضوئيًا؛ لأنه نتيجة طبيعية لطبيعة الضّوء الموجية. وهذا ما سنناقشه الآن.

في (البند 24-5)، رأينا أنه بسبب انتقال الضّوء كموجة، فإنّ الضّوء الصادر من مصدر نقطيّ يمرّ خلال شق، ينتشر نحو الخارج منتجًا نمط حيود (الشّكلان 24-19 و 24-21). ولأنّ للعدسة حوافًّا، فهي تتصرّف كالشق. وعندما تكون العدسة خيالًا لمصدر نقطيّ، فإنّ هذا الخيال هو نمط حيود صغير. لذا، سيكون الخيال مشوشًا حتى في غياب الزّيغانات.



الشّكل 25-28. صورتا خيالين (مكبرتان كثيرًا) مكونتين بوساطة عدسة، تبينان نمط الحيود لخيال (أ) جسم نقطيّ منفرد. (ب) جسمين نقطيّين خيالاهما يكادان أن يكونا منفصلين.

في التحليل الذي يتبع، نفرض أنّ العدسة خالية من الزّيغانات. لذا، نستطيع التّركيز على أنماط الحيود، وإلى أيّ حدّ تحدد قوة التحليل للعدسة. في (الشّكل 25-21)، رأينا نمط الحيود المتكوّن من الضّوء المار عبر شقّ مستطيل له هدبة مركزية قصوى حيث يقع معظم الضّوء. تهبط هذه القمّة المركزية إلى أدنى قيمة على الجانبين عند زاوية θ تعطى بـ

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D}$$

(هذه هي المعادلة 24-3أ)، حيث D هو عرض الفتحة. و λ طول موجة الضّوء المستعمل. θ هي نصف العرض الزاوي للهدبة المركزية. وللزوايا الصغيرة يمكن كتابة

$$\theta \approx \sin\theta = \frac{\lambda}{D}$$

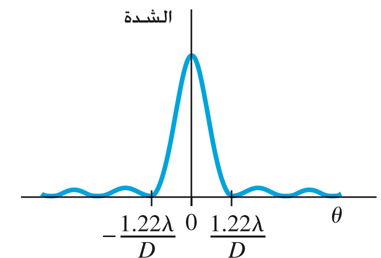
هناك هدب ذات شدّة قليلة على الجانبين. وبالنسبة إلى عدسة أو أيّ فتحةٍ دائرية، فإنّ خيال مصدر نقطيّ سوف يتكوّن من قمة مركزية دائرية (تُسمّى بقعة الحيود أو قرص آيري) محاطة بهدب دائرية خافتة، كما هو مبين في (الشّكل 25-28أ). القمّة المركزية لها نصف عرض زاوي يعطى بـ

الزّاوية الأصغر تعني تفريقًا أفضل.

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الفتحة الدائرية.

تختلف هذه العلاقة عن تلك التي للشق المستطيل بالمعامل 1.22 (المعادلة 24-3). ويظهر هذا المعامل لأنّ عرض الفتحة الدائرية غير منتظم (مثل الفتحة المستطيلة) لكنه يتغير من قطرها D إلى صفر. يبين التحليل الرياضي أنّ العرض "المتوسط" هو $D/1.22$. لذلك، تحصل على المعادلة السابقة بدلًا من (المعادلة 24-3). إنّ شدّة الضّوء في نمط الحيود لضوء من مصدر نقطيّ يمرّ خلال فتحة دائرية مبين في (الشّكل 25-29).



الشّكل 25-29 شدّة الضّوء عبر نمط الحيود لفجوة دائرية.

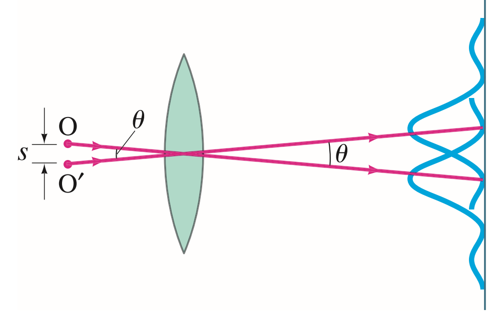
إنّ خيال المصدر غير النقطيّ هو مزيج لتطابق مثل هذه الأنماط. ولمعظم الأغراض نحتاج فقط إلى اعتبار البقعة المركزية؛ لأنّ الحلقات متحدة المركز تكون خافتة جدًّا.

إذا كان هناك مصدران نقطيّان قريبين جدًّا، فسيتطابق نمطًا حيود خياليهما كما في (الشّكل 25-28 ب). وإذا حُرِّك المصدران أقرب، فسنصل إلى انفصال بحيث لا يمكن التمييز بوجود خيالين متطابقين أم خيال واحد. إنّ الانفصال الذي يحدث عنده ذلك يمكن الحكم عليه بصورة مختلفة تبعًا لمشاهدين مختلفين. وعلى أيّ حال، هناك معيار متفق عليه اقترحه اللورد رايلي (1842 – 1919). ينصّ **معيار رايلي** على أنّ خيالين يُعدّان منفصلين عندما يكون مركز قرص الحيود لخيال واحد مباشرة فوق النهاية الصغرى الأولى في نمط الحيود للخيال الثاني. وهذا مبين في (الشّكل 25-30). ولكن لأنّ النهاية الصغرى الأولى تكون عند زاوية $\theta = 1.22\lambda/D$ من القيمة المركزية. (الشّكل 25-30) يبقى أن الجسمين يمكن اعتبارهما منفصلين إذا كانا منفصلين، على الأقل، بالزّاوية θ المعطاة بـ

معيار رايلي (حد التّفريق)

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \qquad [\theta \text{ in radians}] \qquad \textbf{(7-25)}$$

هذا هو الحدّ على التّفريق الذي تفرضه طبيعة الضّوء الموجية بسبب الحيود. وتعني أنّ تحليل الزّاوية الأصغر أفضل. ولهذا، يمكنك عمل أجسام أقرب. ونرى من (المعادلة 25-7) أنه باستعمال طول موجة أقصر تزداد قدرة التّفريق (التحليل).



الشكل 25-30 معيار رايلي. خيالان يُعدّان منفصلين عندما تقع قمة الحيود المركزية لأحدهما مباشرة على أول قيمة دنيا لنمط حيود الخيال الثاني. الجسمان النقطيّان O، وO′ يقابلان زاوية θ عند العدسة. يرسم شعاع واحد فقط (يمرّ خلال مركز العدسة) لكلّ من الجسمين؛ ليشير إلى مركز نمط الحيود لخياله.

المثال 25-10 تلسكوب هَبل الفضائيّ

تلسكوب هَبل الفضائي (HST) هو تلسكوب عاكس، وضع في المدار فوق مجال الأرض. ولذلك، فإنّ قدرة تحليله لن تتأثر باضطراب جوّ الأرض (الشّكل25-31). قطر شيئيته 2.4 m. بالنسبة للضّوء المرئيّ، مثلًا $\lambda = 550\ \text{nm}$. احسب، بالتقريب، تحسين التّفريق الذي يقدمه تلسكوب هَبِلْ فوق التلسكوبات الأرضية، والتي يحدد قدرة تحليلها حركة جوّ الأرض لحوالي نصف ثانية زاويّة. (تقسم كلّ درجة إلى 60 دقيقة، وكلّ واحدة منها تحتوي 60 seconds، لذلك $1° = 3600$ arc seconds).

النّهج: تعطى قدرة التحليل لتلسكوب هَبِلْ (بالراديان) (بالمعادلة 25-7). قدرة تحليل التلسكوبات الأرضية معلومة، ولذلك نحولها أولا إلى راديان من أجل المقارنة.

الحلّ: التلسكوبات الأرضية محددة من حيث قدرة التحليل بـ

$$\theta = \tfrac{1}{2}\left(\frac{1}{3600}\right)^{\circ}\left(\frac{2\pi\ \text{rad}}{360°}\right) = 2.4 \times 10^{-6}\ \text{rad}$$

وبالمقابل، فإنّ منظار هَبل محدد بوساطة الحيود (المعادلة 25-7) حيث بـ $\lambda = 550\ \text{nm}$

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}\ \text{m})}{2.4\ \text{m}} = 2.8 \times 10^{-7}\ \text{rad}$$

وهكذا، يعطي قدرة تحليل أفضل بعشر مرات ($\times 9 \approx 2.4 \times 10^{-6}\text{rad}/2.8 \times 10^{-7}\text{rad}$) تقريبًا

ملحوظة: يستطيع هَبِلْ ملاحظة الإشعاع في المنطقة القريبة من فوق البنفسجية (بطول موجات تصل إلى 115 nm)، وكذلك تحت الحمراء (طول موجة نحو 1 mm)، وهي حدود الطّيف الذي يحجبه الغلاف الجوي. المِجَسّ هو CCD، كما في الكاميرا (انظر البند 25-1) بعدد عناصر صورة 16 MP).



الشّكل 25-31. تلسكوب هَبِلْ الفضائيّ حيث الأرض في خلفية الصّورة. الألواح البرتقالية المستوية هي خلايا شمسيّة تجمع الطّاقة من الشّمس.

المثال 25-11 قرّب قدرة تحليل العين

افرض أنّك في طائرة على ارتفاع 10,000 m. إذا نظرت صوب الأسفل نحو الأرض فاحسب، بالتقريب، المسافة الفاصلة s بين الأشياء التي تستطيع تمييزها. اعتبر الحيود فقط، وافرض أنّ قطر البؤبؤ في عينيك 3.0 mm وطول الموجة $\lambda = 550\ \text{nm}$.

النّهج: نستعمل معيار رايلي، (المعادلة 25-7)، لتقدير θ.

البعد s بين الأجسام يساوي بعدها عنك، $L = 10^4\ \text{m}$ مضروبة في θ (بالراديان)، حيث θ زاوية صغيرة. لذلك $s = L\theta$.

الحلّ: في (المعادلة 25-7)، $D = 3.0\ \text{mm}$ لفتحة العين

$$s = L\theta = L\frac{1.22\lambda}{D}$$
$$= \frac{(10^4\ \text{m})(1.22)(550 \times 10^{-9}\ \text{m})}{3.0 \times 10^{-3}\ \text{m}} = 2.2\ \text{m}$$

تطبيق الفيزياء
مدى جودة رؤية العين

تمرين D يدَّعي أحدهم أنّ كاميرا قمر تجسس تستطيع رؤية عنوان الصفحة الإخبارية الذي طوله 3-cm من على ارتفاع 100 km. إذا كان الحيود هو العامل المحدد الوحيد ($\lambda = 550\ \text{nm}$)، فاستعمل (المعادلة 25-7) لحساب قطر الكاميرا المقصودة.

8-25 قدرة تحليل المناظير والمجاهر؛ حَد λ

قد تعتقد أنّه يمكن تصميم مجهر أو منظار للحصول على أيّ تكبير مطلوب. اعتمادًا على اختيار الأبعاد البؤريّة وجودة العدسات. ولكن ذلك غير ممكن بسبب الحيود. إنّ زيادة التكبير فوق حدّ معيّن يعمل فقط على تكبير أنماط الحيود. وقد يكون هذا مضلّلًا؛ لأنّه قد نعتقد أنّنا سنرى تفاصيل من الجسم أكثر عندما نزيد تفاصيل الحيود. لفحص هذه المسألة، نطبق معيار رايلي:

جسمان (أو نقطتان متجاورتان على جسم ما) يتفرقان فقط إذا كانت بينهما زاوية θ (الشّكل 25-30) تعطى (بالمعادلة 25-7):

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

تنطبق هذه المعادلة على مجهر أو منظار؛ حيث D هي قطر العدسة الشّيئيّة. للمنظار، تتحدد قدرة التحليل باعتبار θ معطاة بهذه المعادلة*.

في المجهر، من الملائم تحديد المسافة، s، بين النقطتين اللتين اعتبرتا منفصلتين: انظر (الشّكل 25-30). بما أنّ الأجسام توضع عادة قرب البؤرة الشّيئيّة للمجهر، فالزّاوية التي يقابلها الجسمان هي $\theta = s/f$، أو $s = f\theta$. إذا جمعنا هذه (بالمعادلة 25-7)، فسنحصل على قدرة تحليل المجهر (**RP**) حيث

قدرة التحليل

$$\mathrm{RP} = s = f\theta = \frac{1.22\lambda f}{D} \qquad (8\text{-}52)$$

حيث f البعد البؤريّ للشيئية، البعد البؤريّ (وليس التردد). تُسَمّى هذه المسافةُ s قدرةَ التحليل للعدسة؛ لأنّها أقلّ مسافة فاصلة بين نقطتين متفرقتين، يفترض أعلى جودة للعدسة لأنّ هذه النهاية تفرضها طبيعة الضّوء الموجية. كلما قلت RP يعني ذلك قدرة تحليل أحسن، وتفاصيل أفضل.



الشّكل 25-32 التلسكوب الراديوي 300-meter في أريسيبو، بورتوريكو، يستعمل موجات المذياع (الشّكل 22-8) بدلا من الضّوء المرئيّ.

المثال 25-12 قدرة تحليل التلسكوب (موجات الرّاديو مقابل الضّوء المرئيّ).

ما الفرق الزاوي الأدنى لنجمين يُعدّان منفصلين بوساطة: (أ) تلسكوب 200-inch على جبل بالومار (الشّكل 25-21 جـ). (ب) تلسكوب راديو أريسيبو (الشّكل 25-32)؛ الذي قطره 300 m ونصف قطر الختاءة 300 m مفترضًا أن $\lambda = 550$ nm لتلسكوب الضّوء المرئيّ في الجزء (أ)، و $\lambda = 4$ cm (أقلّ طول موجي يعمل عليه تلسكوب الراديو) في الجزء (ب).

النّهج: نطبق معيار رايلي (المعادلة 25-7) لكلّ تلسكوب.

الحلّ: (أ) بما أنّ $D = 200$ in أي $D = 5.1$ m، فسنجد من (المعادلة 25–7) أنّ

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{(1.22)(5.50 \times 10^{-7}\,\mathrm{m})}{(5.1\,\mathrm{m})} = 1.3 \times 10^{-7}\,\mathrm{rad}$$

أو 0.75×10^{-5} deg. (لاحظ أنّ ذلك يكافئ تحليل نقطتين البعد بينهما 1 cm من على بعد 100 km!)

(ب) لموجات المذياع $\lambda = 0.04$ m، قدرة التحليل هي

$$\theta = \frac{(1.22)(0.04\,\mathrm{m})}{(300\,\mathrm{m})} = 1.6 \times 10^{-4}\,\mathrm{rad}$$

قدرة التحليل أقلّ؛ لأنّ طول الموجة أكبر بكثير، إلا أنّ الشّيئيّة أكبر. وهذا مناسب.

* التلسكوبات الأرضية بشيئية ذات قطر كبير تحدد عادة ليس من الحيود، بل من آثار أخرى مثل اضطرابات الجوّ. وبالمقابل، فإنّ قدرة التحليل لمجهر ذي جودة عالية تتحدد عادة بالحيود. شيئيات المجاهر هي عدسات مركبة تحتوي عناصر كثيرة ذات أقطار صغيرة (لأنّ f صغيرة)؛ وهذا يقلل الزّيغانات.

ملحوظة: في الحالتين، طبقنا الحدّ الذي يفرضه الحيود. إنّ قدرة تحليل تلسكوب أرضيّ في منطقة الضّوء المرئيّ ليست ذات جودة بسبب الزّيغانات، وبصورة أهم، الاضطراب في الغلاف الجوي. وفي الحقيقة، فإنّ الشيئيات ذات الأقطار الكبيرة لاتزيد قدرة التحليل، ولكنّها تجمّع الضّوء بسبب قدرتها العالية؛ أي أنّها تسمح بضوء أكثر للدخول. لذا، يمكن رؤية الأجسام الخافتة. التلسكوبات الراديوية لا يعيقها اضطرابات الجو، وقدرة التحليل في (ب) هي تقدير جيد.

يضع الحيود قيودًا على التفاصيل التي يمكن رؤيتها على أيّ جسم في (المعادلة 25-8) لقدرة التحليل، لا نستطيع عمليًّا جعل البعد البؤريّ أقلّ من (بالتقريب) نصف قطر العدسة. وحتى هذا يعدّ ضعيفًا جدًّا (انظر إلى معادلة صانعي العدسات، المعادلة 23-10). في هذه الحالة المثلى، (المعادلة 25-8) تعطي $f \approx D/2$

$$\text{RP} \approx \frac{\lambda}{2} \qquad \textbf{(9-25)}$$

وبهذا، يمكننا القول، وفي حدود معامل 2 أو ما يقاربه،
أنه لا يمكن تحليل تفاصيل الأشياء الأصغر من طول موجة الضّوء (الإشعاع) المستعمل؛ فهذه قاعدة مهمة ومفيدة.

قدرة التحليل محدودة بـ λ

تصمّم في المجاهر عدسات مركبة جيدة لدرجة أنّ الحدّ الحقيقي على قدرة التحليل هو الحيود؛ أيّ من قبل طول موجة الضّوء المستعمل. وللحصول على تفاصيل أكثر يجب استعمال موجات أقصر. إنّ استعمال الأشعّة UV يمكن أن يزيد قدرة التحليل بمعامل 2 تقريبًا. وأهم من ذلك بكثير، أنّ الاكتشاف في بداية القرن العشرين توصلت إلى أنّ الإلكترونات لها خصائص موجية (الفصل 27) وأنّ أطوالها الموجية صغيرة جدًّا. استغلت الطبيعة الموجية للإلكترونات في المجهر الإلكتروني (البند 27-9)، الذي يمكن أن يكبر 100 إلى 1000 مرة أكبر من المجهر الضّوئيّ المرئيّ بسبب الأطوال الموجية القصيرة. كما أنّ الأشعّة X أيضًا لها أطوال موجية قصيرة جدًّا، وتستعمل كثيرًا في دراسة الأشياء مفصّلة (البند 25-11).

9-25 قدرة تحليل العين البشرية والتكبير المفيد

إنّ قدرة تحليل عين الإنسان محدودة بعوامل عدّة، جميعها تقريبًا في المدى نفسه من حيث المقدار. كما أنّ قدرة التحليل القصوى هي عند البقعة العمياء، حيث المسافات بين الخرايط أقلّ ما يمكن، $3\,\mu\text{m}$ $(= 3000\text{ nm})$ تقريبًا. يتغيّر قطر البؤبؤ من نحو 0.1 cm إلى حوالي 0.8 cm. ولذلك، عند موجة طولها $\lambda = 550\text{ nm}$ (حيث حساسية العين أكبر ما يمكن)، فإنّ حدّ الحيود هو $\theta \approx 1.22\lambda/D \approx 8 \times 10^{-5}\text{ rad}$ إلى $6 \times 10^{-4}\text{ rad}$. حيث طول العين 2 cm تقريبًا، وهذا يعطي قدرة تحليل (المعادلة 25-8) $s \approx (2 \times 10^{-2}\text{ m})(8 \times 10^{-5}\text{ rad}) \approx 2\,\mu\text{m}$ في أحسن حال ونحو $15\,\mu\text{m}$ في اسوأ حال حيث يكون (البؤبؤ صغيرًا).كما يحدّد كلّ من الحيود الكروي والزيوغ اللوني القدرة على التحليل لتصبح $10\,\mu\text{m}$ والنتيجة النهائية هي أنّ العين يمكن أن تفرق أشياء تفصلها زاوية مقدارها

أفضل قدرة تحليل للعين

$$5 \times 10^{-4}\text{ rad}$$

في أحسن الأحوال. وهذا يقابل أشياء تبعد عن بعضها 1 cm وتقع على بعد 20 m تقريبًا.
إنّ أقرب نقطة نموذجية للعين البشرية هي 25 cm. حيث يمكن للعين عند هذه المسافة، أن تفرق أجسامًا تفصلها مسافة $(25\text{ cm})(5 \times 10^{-4}\text{ rad}) \approx 10^{-4}\text{ m} = \frac{1}{10}\text{ mm}$.

وبما أنّ أفضل مجهر لا يمكنه أن يفرق أكثر من 200 nm في أحسن حال (معادلة 9-25 للضوء البنفسجي)، حيث $\lambda = 400\text{ nm}$). لذا يحدد التكبير المفيد بـ [قدرة تحليل العين المجردة/قدرة تحليل المجهر]

أعلى تكبير مفيد للمجهر

$$\frac{10^{-4}\text{ m}}{200 \times 10^{-9}\text{ m}} \approx 500\times$$

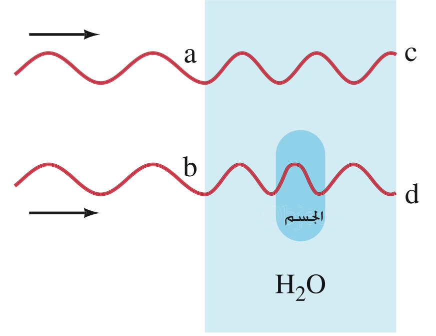
وعمليًّا، ما يستخدم تكبير بحدود ×1000 لتقليل إجهاد العين. أن أي تكبير أكثر قد يجعل نمط الحيود الناتج من شيئية المجهر مرئيًّا.

* 10-25 مجاهر الاختصاص والتباين (التمايز)

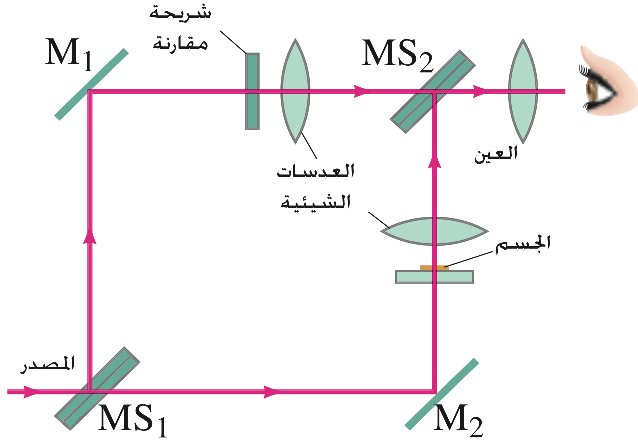
مهما بلغت قدرة التحليل التي قد يحققها الجهر. فلن تكون ذات فائدة إن لم نستطع تمييز الجسم الذي نريد رؤيته عن الخلفية. إنّ الاختلاف في إضاءة خيال جسم ما وخيال ما يحيط به يُسَمّى **التباين** (التمايز). الذي يعدّ تحقيقه بصورة عالية مسألة مهمّة في الجهر وأشكال التّصوير الأخرى. تنشأ المشكلة في عالم الحياة. مثلًا. لأنّ الخلايا تتكوّن من الماء بشكل كبير. وعليه. تكون شفافة للضوء. الآن. سنناقش بإيجاز نوعين خاصين من الجاهر تستطيع زيادة التباين هما: مجهر التّداخل. ومجهر تباين – الطّور.

تطبيق الفيزياء
مجهر التداخل

يستعمل **مجهر التّداخل** الخصائص الموجية للضّوء بطريقة مباشرة بزيادة التباين في الجسم الشفاف. افترض جسمًا شفافًا. مثلًا. بكتيريا في ماء (الشّكل 25-33). يدخل الضّوء بانتظام من اليسار ويكون مترابطًا (في الطّور) عند النقاط جميعها مثل أ. ب. إذا كان الجسم شفافًا كالماء. فإنّ الشعاع الخارج عند د سيكون لامعًا كالشعاع عند ج. ولن يكون هناك تباين. ولن يُشاهد الجسم. ولكن. إذا كان معامل انكسار الجسم مختلفًا عن محيطه. فسوف يختلف طول الموجة داخل الجسم كما هو مبين. وعليه. سوف تختلف موجات الضّوء بالطّور عند ج و د. إن لم يكن الاختلاف في الاتساع أيضًا. يغير مجهر التداخل هذا الاختلاف في الطّور إلى اختلاف في الاتساع حيث تكشف العين عن ذلك. وبتراكب الضّوء المار خلال الجسم. يتداخل مع شعاع مرجعي لا يمرّ في ذلك الجسم. إحدى طرائق عمل ذلك مبينة في (الشّكل 25-34). الضّوء القادم من المصور يوزع إلى شعاعين متساويين بوساطة مرآة نصف مفضضة، MS_1. يمر أحدّ الشعاعين في الجسم. ويمر الشعاع الثاني بنظام مماثل دون الجسم. يلتقي الشّعاعان ثانية. ثم يتراكبان بوساطة المرآة نصف – المفضضة MS_2 قبل دخولهما إلى العينيّة ثم العين. يعدل طول مسار (والاتساع) شعاع المقارنة بحيث تصبح الخلفية داكنة؛ يحدث تداخل هدّام تام. كما سيتداخل الضّوء المار من الجسم (الشعاع ب د في الشّكل 25-33) أيضًا مع شعاع المرجع. ولكن بسبب اختلاف طوره. فلن يكون التّداخل هدّامًا بصورة تامّة. وهكذا. سوف يظهر أكثر لمعانًا من محيطه. حيث يختلف الجسم بالسمك. وسوف يختلف فرق الطّور بين الشعاعين أجـ و ب د في (الشّكل 25-33)، وهذا يؤثر في مقدار التداخل. لذا. فإنّ التّغيّر في سمك الجسم سوف يظهر كتغير في لمعان الخيال.



الشّكل 25-33 الجسم - مثلا بكتيريا - في محلول مائيّ



الشّكل 25-34. مخطط مجهر التداخل.

يستفيد **مجهر تباين – الطّور** أيضًا من التّداخل وفروق الطّور للحصول على خيال عالي التباين. يتحقّق التّباين بوساطة حلقة صفيحة طور زجاجيّة فيها أخدود (ثَلم) (أو جزء مرتفع) على شكل حلقة موضوعة بحيث تمرّ أشعة المصور غير المنحرفة من خلالها. أمّا الأشعّة المنحرفة بوساطة الجسم فلا تمرّ من خلال هذه الحلقة؛ لأنّ الأشعّة التي يحرفها الجسم تنتقل خلال سمك مختلف من الزّجاج أكثر من الأشعّة غير المنحرفة. يصبح الشعاعان مختلفين في الطور. ويتداخلان تداخلًا هدّامًا عند مستوى خيال الجسم. وبهذا. يتباين خيال الجسم بصورة واضحة عن الخلفية. إنّ أخيلة مجهر تباين الطّور تميل إلى تكوين "هالات" حولها (كنتيجة للحيود من فتحة صفيحة – الطّور). لذا. علينا الاحتياط والحذر عند تفسير الأخيلة.

تطبيق الفيزياء
مجهر تباين – الطور.

* 11-25 أشعة – X وحيودها

في عام 1895 اكتشف رونتجن (1845–1923) (W. C. Roentgen) أنّه عندما تتسارع الإلكترونات بجهد كهربائي عال في أنبوب مفرغ، ثم يسمح لها أن تصطدم بالزجاج أو سطح فلزيّ داخل الأنبوب، فإنّ معادن متفلورة بعيدة سوف تتوهج، ويتم تعريض الفيلم الفوتوغرافي. عزا رونتجن هذه الآثار إلى نوع جديد من الإشعاع (مختلف عن الأشعّة المهبطية). سُمِّيَ **أشعة – X** إشارة للرمز الجبري x، الذي يعني كمية مجهولة. اكتشف بعدها أنّ الأشعّة – X اخترقت بعض المواد أكثر من مواد أخرى، وبعد أسابيع قليلة عرض أول صورة بوساطة أشعة – X (وكانت ليد زوجته).

إنتاج الأشعّة – X حاليًّا يتم عادة في أنبوب (الشّكل 35 – 25) يشبه الأنبوب الذي استعمله رونتجن باستعمال جهود كهربائية تتراوح بين 30 kV و150 kV.

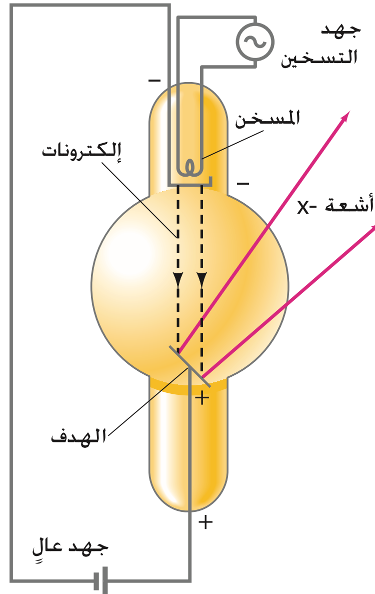
أشار البحث في طبيعة أشعة – X إلى أنها ليست جسيمات مشحونة (مثل الإلكترونات) لأنّها لم تنحرف بوساطة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ. وقد اقترح أنها قد تكون شكلاً من الضّوء غير المرئيّ. على أيّ حال، فإنها لم تُعطِ أنماط حيود أو تداخل باستعمال شبكات الحيود العادية. وبالفعل، إذا كانت أطوالها الموجية أصغر بكثير من أبعاد محززات الحيود العادية 10^{-6} m $(= 10^3$ nm$)$ فلا تتوقع هذه الآثار. وفي عام 1912 تقريبا، اقترح ماكس فون لاوي (1879 – 1960) أنه إذا رتبت الذرات في بلورة بصفوف منتظمة (انظر الشّكل 13 – 2 أ) فإنّ مثل هذه البلورة ستخدم مثل محززة حيود لأطوال موجية قصيرة جدًّا في حدود الأبعاد بين ذرات البلورة نحو 10^{-10} m $(= 10^{-1}$ nm$)$. وقد أثبتت التجارب مباشرة بعد ذلك أنّ أشعة – X المتشتتة من البلورة أظهرت القمم والوديان لنمط الحيود (الشّكل 36–25).

وهكذا تبين أنّ أشعة – X لها الطبيعة الموجية، وأنّ الذرات تكون مرتبة في شبكية منتظمة في البلورات. وحاليّا، تصنف الأشعّة – X بأنها موجات كهرومغناطيسية بطول موجي نحو 10^{-2} nm إلى 10 nm، وهو المدى الذي تم الحصول عليه في أنبوب أشعة – X.

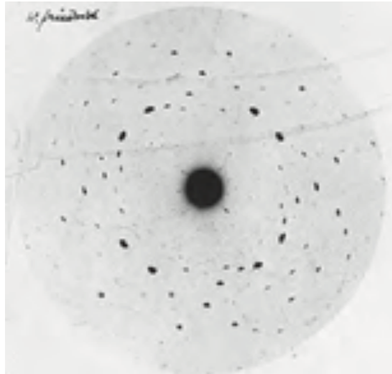
لقد رأينا في (البندين 25–7، و 25–8) أنّ الضّوء ذا طول الموجة الأقصر ينتج قدرة تحليل أعلى عندما نتفحّص جسمًا مجهريًّا. ولأنّ أشعة X لها موجات أقصر من الضّوء المرئيّ، فإنها، من حيث المبدأ، تقدم قدرة تحليل أعلى بكثير. ولكن، يبدو أنه لا توجد مادة فاعلة لتستعمل كعدسة للموجات القصيرة جدًّا لأشعة – X. وبدلا من ذلك، فإنّ الأسلوب الفاعل والمعقد **لحيود أشعة – X (التّصوير البلوري بأشعة–X)** أثبت فاعليته العالية في فحص عالم الذرات والجزيئات المجهرية. في بلورة بسيطة مثل NaCl، تترتب الذرات على شكل مكعب منتظم، (الشّكل 25–37)، وتبتعد مسافة d عن بعضها. لو أسقطنا حزمة من أشعة – X على البلورة بزاوية مع السّطح، وأنّ الشعاعين المبينين انعكسا عن مستويين متتاليين للذرات كما هو مبين، فسوف يتداخل الشعاعان تداخلا بنّاءً إذا كان الفرق بين المسافتين اللتين يقطعهما الشعاعان يساوي عددًا صحيحًا من الأطوال الموجة. هذه المسافة الفائضة هي $2d \sin \phi$. ولذلك ينتج تداخل بنّاء إذا

$$m\lambda = 2d \sin \phi, \qquad m = 1, 2, 3, \cdots \tag{10-25}$$

حيث m هي أيّ عدد صحيح. (لاحظ أنّ ϕ ليست الزّاوية بالنسبة للعمودي على السّطح). وتُدعى هذه **معادلة براغ** نسبة إلى W. L. Bragg (1890 – 1971)، الذي اشتقها، والذي طوّر مع والده W.H. Bragg (1862 – 1942) نظرية حيود أشعة – X وأسلوبه بالبلورات في الفترة 1912 – 1913. إذا علمنا طول موجة أشعة – X، وقيست الزّاوية ϕ، يمكن عندئذٍ حساب المسافة d بين الذرات. وهذا هو الأساس في تصوير البلورات بالأشعّة – X.

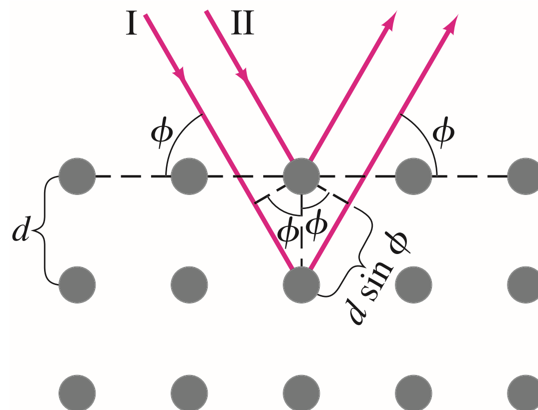


الشّكل 25 - 35. أنبوب أشعة - X. الإلكترونات المنطلقة من فتيل تسخين في أنبوب مفرغ تتسارع بجهد عالٍ. عندما تصطدم بسطح المصعد، "الهدف" تنطلق الأشعّة - X.



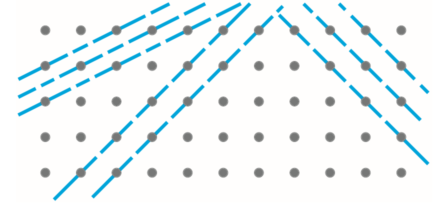
الشّكل 25 - 36. نمط حيود أشعة - X في أول مشاهدات ماكس فون لاو 1912 عندما سلّط شعاع أشعة - X على بلورة كبريتيد الزنك. نمط الحيود تم كشفه مباشرة على لوحة تصوير.

معادلة براغ



الشّكل 25-37. حيود أشعة - X بوساطة البلورات

إنّ أنماط حيود الأشعّة – X الحقيقية معقدة. وقبل كلّ شيء، فإنّ البلّورة هي جسم ثلاثيّ الأبعاد، والأشعّة– X يمكن أن تحيد من مستويات مختلفة، وبزوايا مختلفة أيضًا ضمن البلورة، كما يبين (الشّكل 25–38). وعلى الرّغم من أنّ التحليل معقد جدًّا، فمن الممكن تعلم أشياء كثيرة عن أيّ مادة بحيث يمكن وضعها في هيئة بلورية. إذا كانت المادة ليست بلورة منفردة، بل مزيجًا من كثير من البلورات الصغيرة؛ كما في الفلز أو المسحوق عندها تنتج سلسلة من الدوائر. (الشّكل 25–9)، فإنّ كلًّا منها يقابل حيودًا برتبة معينة m من مجموعة من المستويات المتوازية، بدلًا من سلسلة من البقع، كما في (الشّكل 36–25).



الشّكل 25-38 يمكن حيود أشعة – X من مستويات كثيرة ضمن البلورة.

الشّكل 93-25 (أ) حيود أشعة – X من مادة معقدة التركيب البلوري تنتج مجموعة من الحلقات الدائرية كما في (ب)، وهي لمادة اسيتواسيتات الصوديوم.



لقد كان حيود أشعة – X مفيدًا في تحديد تركيب جزيئات حيوية مهمّة، مثل التركيب اللولبي الثنائي لـ DNA، الذي استنتجه جيمس واطسون وفرانسيس كريك في عام 1953. انظر (الشّكل 25–40)، ولنماذج اللولب الثنائي، (الشّكلين 16–44 أ، و 16 – 45). حوالي 1960، التركيب التفصيلي لجزيء البروتين، ميوجلوبين، تم شرحه بمساعدة حيود أشعة – X. وتبع ذلك تركيب أحد مكونات الدم المهمة، الهيموجلوبين، تم عمله، ومنذ ذلك تم تحديد تركيب الكثير من الجزيئات بمساعدة أشعة – X.

الشّكل 40 - 25 صورة حيود أشعة – X لجزيء DNA التقطت من قِبَلِ روزاليند فرانكلين في بداية 1950. أشار صليب البقع إلى أنّ DNA عبارة عن لولب.



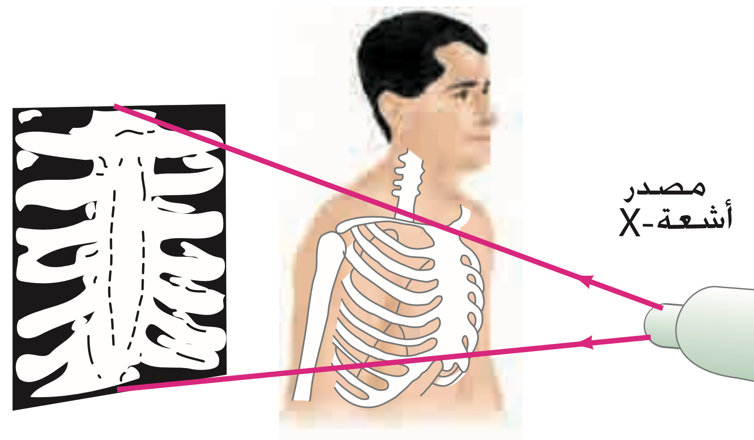
* 12-25 تصوير أشعة – X والتّصوير الطّبقيّ لمحوسب (مسح CT)

* خيال أشعة – X العاديّ

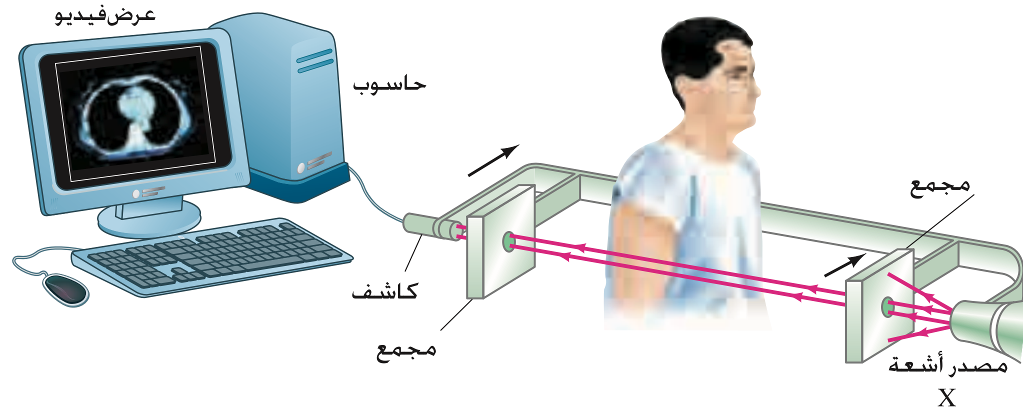
تطبيق الفيزياء
خيال أشعة - العادى

لصورة أشعة – X الطبية أو السّنّيّة العادية، الأشعّة – X الخارجة من الأنبوب (الشّكل 25–35) تمر خلال الجسم، ثم يكشف عنها على فيلم تصوير أو شاشة متوهجة. (الشّكل 25 – 41). تسير الأشعّة في خطوط مستقيمة تقريبًا خلال الجسم مع انحراف لا يذكر لأنه عند موجات الأشعّة – X هناك حيود أو انكسار قليل. هناك امتصاص (أو تشتت)، وعلى أيّ حال، فإنّ اختلاف الامتصاص بتراكيب الجسم المختلفة هو الذي يعطي الخيال الناتج من الأشعّة النافذة. كلما كان الامتصاص أقلّ، كان النفاذ أكثر، والفيلم معتمًا. فالخيال هو "ظل" لما مرت به الأشعّة. إنّ خيال أشعة – X لا ينتج من تجميع الأشعّة بالعدسات كما في الأجهزة التي تمّت مناقشتها سابقًا في هذا الفصل.

تنويه:
خيالات الأشعّة – X هي ظلال، ليست هناك عدسات.



الشّكل 25-41 تصوير أشعة – X العادي، والذي هو في الواقع تظليل.



الشّكل 42 - 25 التّصوير الطّبقيّ: يتحرك مصدر أشعة - X والكاشف معًا عبر الجسم، تقاس شدّة الأشعّة النافذة عند نقاط متعددة كثيرة. ثم يدار هذا النظام قليلًا (نفرض 1°) ثم نعمل مسحًا جديدًا. تُكرّر العملية هنا لـ 180°. يعيد الحاسوب إنشاء الخيال للشريحة، ثم توضع على جهاز عرض تلفزيونيّ TV.

* خيالات التّصوير الطّبقيّ (CT).

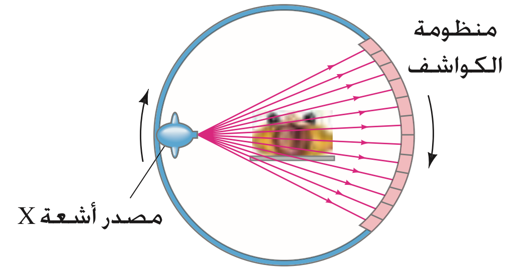
تطبيق الفيزياء
خيالات التّصوير الطّبقيّ المحوسب.

في خيالات أشعة – X العادية، يُسقط سمك الجسم كاملًا على الفيلم؛ تتطابق التركيبات. وفي كثير من الحالات يصعب تمييزها. في فترة 1970 تمّ تطوير تقنية جديدة للأشعة – X تُسَمّى التّصوير الطّبقيّ المحوسب (CT) الذي ينتج خيالًا لشريحة خلال الجسم. (تأتي كلمة **tomography** من اليونانية طبقة = *tomos*، صورة = *graph*.). وأصبح من الممكن رؤية التركيبات والأضرار التي كان يصعب فحصها سابقًا بوضوح. المبدأ الذي يستند إليه CT مبين في (الشّكل 25 – 42): حزمة رفيعة من أشعة – X (معمولة خطية) تمرّ خلال الجسم إلى الكاشف الذي يقيس الشدّة النافذة.

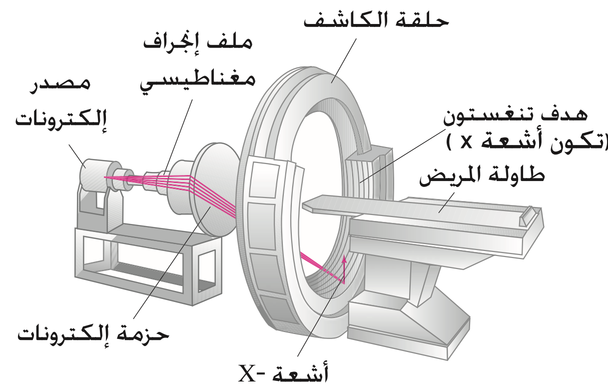
تتمّ الأقيسة على عدد كبير من النقاط حيث يتمّ تحريك المصدر والكاشف معًا فوق الجسم. ثُمَّ يدار النظام قليلاً حول محور الجسم. ومن ثَمَّ يمسح الجسم مرّة ثانية؛ يتمّ تكرار ذلك بمعدل 1° كلّ مرّةٍ حتى تغطية 180°. ترسل شدّة الحزمة النافذة للنقاط الكثيرة في كلّ مسح، ولكلّ زاوية، إلى حاسوب يعيد بدوره بناء خيال الطبقة. لاحظ أنّ الطبقةَ المصورةَ عموديّةٌ على محور الجسم. لهذا، يُسَمّى CT أحيانًا التّصوير **الطّبقيّ المحوري المحوسب** (CAT)، على الرّغم من أنّ الاختصار CT يمكن قراءته كالتالي: التّصوير الطّبقيّ بمساعدة الحاسوب.

مسوحات CAT

يحتاج استعمال كاشف منفرد كما في (الشّكل 25 – 42) إلى دقائق قليلة للعدد الكبير من المسوحات اللازمة لتكوين خيال كامل. وتستعمل الماسحات السريعة حزمة مروحية. (الشّكل 25 – 43أ). حيث تُكشف الحزمُ المارة في المقطع العرضي للجسم بوساطة كثير من الكواشف في الوقت نفسه. ثم يُدار المصدر والكواشف بعد ذلك حول المريض، وبالتالي يحتاج الخيال إلى ثوان قليلة. وبشكل أسرع، تعدّ مفيدة لمسح القلب، وهي آلات ثابتة المصدر حيث يوجه شعاع من الإلكترونات (بوساطة مجال مغناطيسي) إلى أهداف التنجستون يحيط بالمريض، لتطلق أشعة – X. (انظر الشّكل 25 – 43 ب).



(أ)



(ب)

الشّكل 25 - 43 (أ) ماسح الحزمة المروحية. تقاس الأشعّة النافذة خلال الجسم كلّه آنيًا عند كلّ زاوية. يُدار كلّ من المصدر والكاشف لأخذ أقيسة عند زوايا مختلفة. في نوع آخر من ماسح الحزمة المروحية، هناك كواشف حول 360° للدائرة التي تبقى ثابتة مع دوران المصدر. (ب) في نوع آخر، يوجّه شعاع إلكترونات من المصدر بوساطة مجال مغناطيسي على أهداف من التنجستون تحيط بالمريض.

* تشكيل (تكوين) الخيال

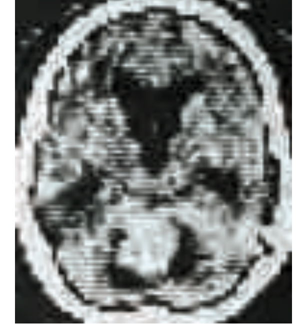
كيف يتشكّل الخيال؟ يمكننا التفكير بالطبقة المراد تصويرها كأنّها مقسّمة إلى صور صغيرة كثيرة (أو عناصر صورة). يمكن أن تكون مربّعةَ الشّكل. (مثلًا، انظر الشّكل 24 – 49). لـ CT فإنّ عرض كلّ عنصر صورة (بيكسل) يختار وفقا لعرض الكواشف و/ أو عرض حزم الأشعّة – X. وهذا يحدد قدرة تحليل الخيال، والذي يمكن أن يكون 1 mm. يقيس كاشف الأشعّة – X شدّة الحزمة النافذة. وبطرح هذه الكمية من شدّة الحزمة عند المصدر، يعطي الامتصاص الكلي (يدعى المسقط) على امتداد خط الشعاع.

تستعمل طرق رياضية معقدة لتحليل مساقط الامتصاص، للعدد الهائل من مسوحات الحزمة المقيسة (انظر البند التالي)، لاستنتاج الامتصاص لكلّ عنصر صورة، وإعطائه "قيمة رمادية" تبعا لمقدار الإشعاع الممتص.

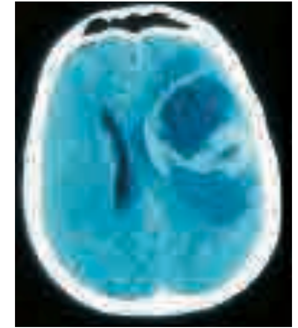
يتكون الخيال من بقع صغيرة (بيكسل) متغيرة الظلال رمادية. عادة، يعطى مقدار الامتصاص رمزًا – لونيًا. الألوان الظاهرة في خيال "اللون – الخطأ" الناتج لا علاقة لها، على أيّ حال، مع اللون الحقيقي للجسم.

يُظهر (الشّكل 25 – 44) كيف تبدو أخيلة CT الحقيقية. ومن المتفق عليه بصورة عامة أنّ المسح CT قد أحدث ثورة في بعض مجالات الطب بتزويد جهد أقلّ و/ أو تشخيص أقلّ.

ويمكن توظيف التّصوير الطّبقيّ المحوسب أيضًا في التّصوير فوق الصّوتيّ (البند 12 – 9) ولإشعاعات النظائر المشعة، والرّنين المغناطيسيّ النوويّ (البندان 31 – 8، و 31 – 9).



(أ)



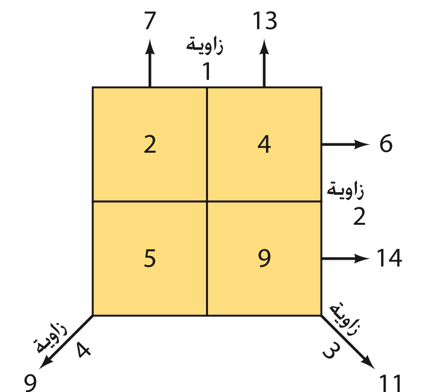
(ب)

الشّكل 44 - 25. خيالا CT، بقدرة تحليل مختلفة، يبين كلّ منهما مقطعًا عرضيًا للدماغ. الصّورة (أ) قليلة التحليل. (ب) صورة دقيقة التحليل، تبين ورما سرطانيًا في الدّماغ (المنطقة الداكنة على اليمين).

* إعادة بناء خيال التّصوير الطّبقيّ

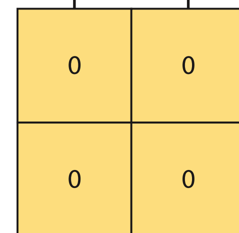
كيف يمكن تحديد "رمادية" كلّ بيكسل على الرّغم من أنّ كلّ ما نستطيع قياسه هو الامتصاص الكلي على امتداد كلّ خط حزمة في الشّريحة؟ يمكن عمل ذلك فقط باستعمال المسوحات الحزمية الكثيرة والمأخوذة عند زوايا مختلفة كثيرة. افرض أنّ الخيالَ منظومةٌ من 100×100 عنصر بعدد كلّيّ 10^4 بيكسل. إذا كان لدينا 100 زاوية مختلفة، فسنحصل على 10^4 قطعة معلومات. ومن هذه المعلومات يمكن إعادة بناء الخيال، ولكن ليس بدقة. أما إذا قيست زوايا أكثر، فيمكن عندئذٍ إعادة بناء الخيال بدقة أكبر.

ولاقتراح كيفية إعادة البناء الرياضي، نفترض حالة بسيطة جدًا باستعمال تقنية "الإعادة". افرض أنّ شريحة عينتنا مقسمة إلى 2×2 بيكسل كما هو مبين في (الشّكل 45–25). يمثل العددُ في كلّ بيكسل مقدارَ امتصاص المادة في تلك المساحة (أعشار في المئة)؛ أي أنّ 4 تمثل ضعف الامتصاص الذي تمثله 2. لكننا لا نستطيع قياس هذه القيم مباشرة؛ إنها مجاهيل يجب معرفتها. كلّ ما نستطيع قياسه هي المساقط – الامتصاص الكلي على امتداد خط كلّ حزمة – وهذه تبين في المخطط كمجموع الامتصاصات لعناصر الصّورة على امتداد كلّ خط بأربع زوايا مختلفة. هذه المساقط (معطاة عند رأس كلّ سهم) هي ما نستطيع قياسه. ونريد العمل عكسيًّا منها لنرى إلى أيّ قرب يمكن أن نحصل على الامتصاص الحقيقي لكلّ بيكسل. نبدأ تحليلنا بإعطاء كلّ بيكسل القيمة 0. (الشّكل 46–25 أ). في تقنية الإعادة، نستعمل المساقط لتقدير قيمة الامتصاص في كلّ مربع، ثم نكرّر لكلّ زاوية. حيث مساقط الزّاوية 1 هي 7، و 13. عند تقسيم كلًا منهما بالتساوي بين مربعيهما: يحصل كلّ مربع في العمود الايسر على $3\frac{1}{2}$ (أو 7 انصاف) ويحصل كلّ مربّعٍ في العمود الايمن على $6\frac{1}{2}$ (أو 13 نصف) (نصف 13)؛ انظر (الشّكل 25 – 46 ب). ثم نستعمل المساقط عند الزّاوية 2.

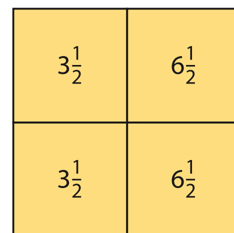


الشّكل 45 - 25 خيال 2×2 يبين قيم الامتصاص الحقيقي والمساقط المقيسة.

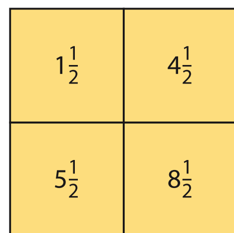
الشّكل 46 - 25. إعادة بناء الخيال باستعمال المساقط في عملية الإعادة.



(أ)

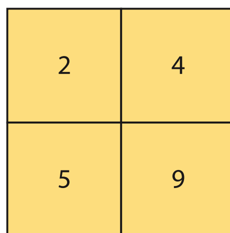


(ب)





(ج)



(د)

نحسب الفرق بين المساقط المقيسة في الزّاوية 2 (6، و14). والمساقط المعتمدة على التّقريب السّابق (السّطر العلويّ: $10 = 6\frac{1}{2} + 3\frac{1}{2}$؛ والشيء ذاته بالنسبة للسّطر السّفليّ). ثم نوزّع هذا الفرق بالتساوي على المربعات في ذلك السّطر. للسّطر العلويّ لدينا

$$6\tfrac{1}{2} + \frac{6-10}{2} = 4\tfrac{1}{2} \quad \text{و} \quad 3\tfrac{1}{2} + \frac{6-10}{2} = 1\tfrac{1}{2}$$

وللسّطر السّفليّ

$$6\tfrac{1}{2} + \frac{14-10}{2} = 8\tfrac{1}{2} \quad \text{و} \quad 3\tfrac{1}{2} + \frac{14-10}{2} = 5\tfrac{1}{2}$$

هذه القيم تُدْخَل كما في (الشّكل 46 – 25 جـ). تاليًا، المساقط عند الزّاوية 3 تعطي:

(يسار فوق) $1\frac{1}{2} + \frac{11-10}{2} = 2$ و (يمين تحت) $8\frac{1}{2} + \frac{11-10}{2} = 9$

وتلك الزّاوية 4 تعطي

(يسار تحت) $5\frac{1}{2} + \frac{9-10}{2} = 5$ و (يمين فوق) $4\frac{1}{2} + \frac{9-10}{2} = 4$

تعود النتيجة المبينة في (الشّكل 46 – 25 د). بالضبط للقيم الحقيقية. (في المواقف الحقيقية، القيم الصحيحة ليست معلومة، لذلك فهذه الطرق الحاسوبية مطلوبة). وللحصول على هذه الأرقام بالضبط؛ نستعمل 6 قطع للمعلومات (اثنتان عند كلّ من الزاويتين 1، و 2؛ واحدة عند كلّ من الزاويتين 3، 4). ولعدد البيكسل الكبير والمستعمل للأخيلة الحقيقية، فإنّنا لا نصل إلى القيم الدقيقة، لذا، نحتاج إلى عدد كبير من عمليات الإعادة. وتكون الحسابات دقيقة بصورة كافية عندما يكون الفرق بين القيم المحسوبة والمقيسة صغيرًا بدرجة كافية. المثال السابق يظهر الانتقاء" لهذه العملية: إنّ أول عملية إعادة (ب إلى ج في الشّكل 46 – 25) غيرت القيم بـ 2، في حين غيّرت آخر عملية إعادة (ج إلى د) بـ $\frac{1}{2}$ فقط.

ملخص

تكوّن عدسة الكاميرا خيالًا على الفيلم أو على أداة مقرنة بالشحنة في الكاميرا الرّقميّة، عن طريق السماح للضّوء بالعبور خلال المغلاق. يعدّل الوضع البؤريّ للعدسة بتحريكها نسبة إلى الفيلم، ويجب تعديل **حاجز** – f لها (أو فتحة العدسة) تبعًا لإضاءة المشهد، وسرعة المغلاق المنتقاة. تتعدل **العين** البشرية أيضًا تبعًا للإضاءة المتاحة – بفتح القزحية وغلقها. فهي تعدل التبئير ليس بتحريك العدسة، ولكن بتعديل شكلها بحيث تغير بعدها البؤريّ. يتكون الخيال على الشّبكيّة التي تحتوي منظومة من المستقبلات تعرف بالقضبان والمخاريط.

تستعمل نظارة العين المفرّقة أو العدسات اللاصقة لتصحيح العين الحسيرة التي لا تستطيع رؤية الأجسام البعيدة بوضوح. أمّا العدسات اللامة، فتستعمل لتصحيح عيوب العين التي لا ترى الأجسام القريبة بوضوح.

المكبر البسيط هو عدسة محدّبة تكوّن خيالًا وهميًّا لجسم موضوع عند (أو ضمن) البؤرة. **التكبير الزاوي** عندما نرى بعين مرتخية طبيعية هو:

$$M = \frac{N}{f} \qquad \textbf{(2 – 25 أ)}$$

حيث f البعد البؤريّ للعدسة، وN أقرب مسافة للرؤية الواضحة (25 cm "للعين الطبيعية").

يتكون **التلسكوب الفلكيّ** من عدسة شيئية أو مرآة، وعدسة عينية تكبّر الخيال الحقيقيّ المتكوّن **بالشّيئيّة**. **التكبير** يساوي النسبة بين البعد البؤريّ للشيئية إلى البعد البؤريّ للعينية، ويكون الخيال مقلوبًا:

$$M = -\frac{f_o}{f_e} \qquad \textbf{(3 – 25)}$$

[* يستعمل **المجهر المركّب** أيضًا عدستين؛ شيئية وعينية. ويكون الخيال النهائيّ مقلوبًا. التكبير الكليّ هو حاصل ضرب تكبير كلتا العدستين في بعضهما. ويساوي على نحو تقريبيّ

$$M \approx \frac{Nl}{f_e f_o} \qquad \textbf{(6 – 25 ب)}$$

حيث l البعد بين العدستين، أمّا N فبُعد النّقطة القريبة للعين، في حين f_o، وf_e هما البعدان البؤريّان للشيئية والعينيّة على الترتيب.]

المجاهر، والتلسكوبات، والأجهزة الضّوئيّة الأخرى تكون محددة في تشكيل أخيلة حادة بعيوب العدسات. وهذا يتضمن الزّيغان الكرويّ الذي لا تتجمع فيه الأشعّة التي تمرّ خلال حواف العدسة في النّقطة نفسها كالتي تمرّ عند مركز العدسة؛ أمّا الزّيغان اللونيّ، فهو الذي تتجمع الألوان المختلفة فيه في نقاط مختلفة. إنّ العدسات المركّبة، المكونة من عدة عناصر، يمكن أن تصحح العيوب بدرجة كبيرة.

كذلك، فإنّ طبيعة الضّوء الموجية تحدّد حدّة الأخيلة، أو قدرة التحليل. وبسبب الحيود، لا نستطيع إدراك تفاصيل أقلّ من طول موجة الإشعاع المستعمل. وهذا يحدّد قوة تكبير المجهر الضّوئيّ بنحو 500×.

[* **الأشعّة – X** هي نوع من الموجات الكهرومغناطيسية بطول موجة قصير جدًّا. تنتج هذه الأشعّة عندما تصطدم إلكترونات عالية السرعة، تمّ تسريعها بجهد كهربائيّ كبير في أنبوب مفرغ، بهدف زجاجي أو فلزي.]

[* **التّصوير الطّبقيّ المحوسب** (مسوحات CT أو CAT) تستعمل حزم أشعة – X ضيقة خلال مقطع في الجسم لتكوين خيال المقطع.]

أسئلــة

25 – 1 الكاميرات.

1. لماذا يكون عمق المجال أكبر والخيال أكثر حدّة، عندما تكون عدسة الكاميرا قد "خفضت" إلى عدد – f أكبر؟ أهمل الحيود.

2. صف كيف يؤثر الحيود في نصّ السؤال 1. [مساعدة: انظر المعادلة 3 – 24، أو 7 – 25].

3. لماذا يجب تحريك عدسة الكاميرا بعيدًا عن الفيلم للتركيز على جسم قريب؟

4. لماذا يحتاج كبار السّنّ إلى نظارات ثنائية البؤرة خاصة أكثر من الشباب؟

5. هل سيرى شخص مصاب بقصر النّظر بصورة أوضح تحت الماء عندما يضع النظارة المصححة؟ استعمل مخطّطًا ليبين فيما إذا كان هذا صحيحًا أم لا.

6. تستطيع معرفة الشّخص إن كان مصابًا بقصر النّظر أو طوله عن طريق النّظر إلى عرض وجهه خلال نظارته. إذا ظهر عرض وجه الشخص أضيق خلال النظارات (الشّكل 47 – 25)، فهل هذا الشخص مصاب بقصر النّظر أم طوله ؟



الشكل **25** - **47** (السّؤال 6)

7. إنّ التّحديق بنصف إغماضة يساعد في رؤية تفاصيل بعيدة. فسّر السّبب.

8. هل الخيال المتكون على شبكية العين البشرية معتدلًا أم مقلوبًا؟ ناقش ما يتضمنه ذلك على إدراكنا للأشياء.

9. تشبه عين الإنسان الكاميرا إلى حدّ بعيد – حتى إذا ترك مغلاق الكاميرا مفتوحًا وحركت الكاميرا فسيتشوه الخيال؛ ولكن عندما تحرك رأسك وعيناك مفتوحتان، فسترى بوضوح. فسّر ذلك.

10. عدسات القراءة هي عدسات لامة. المكبّر البسيط هو أيضًا عدسة لامة. وبالتالي، هل عدسات القراءة مكبّرة؟ ناقش أوجه الشبه والاختلاف بين العدسات اللامة المستعملة في هذين الغرضين.

11*. المجاهر زهيدة الثمن التي يستعملها الأطفال تنتج عادةً صورًا ملونة عند الحواف. لماذا؟

12*. يمكن تقليل الزّيغ اللونيّ في العدسة الرقيقة إذا انحنت الأشعّة بالتساوي عند السّطحين. إذا استعملت عدسة مستوية محدبة لتكوين خيال حقيقي لجسم في اللانهاية، فأيّ السّطحين سوف يكون في مقابل الجسم؟ استعمل رسمًا تخطيطيًا لتبين السبب.

13*. أيّ الزّيغانات الموجودة في عدسة بسيطة ليست موجودة (أو في أقلّ قيمة لها) في عين الإنسان؟

14*. فسّر سبب حدوث الزّيغ اللونيّ في العدسات الرّقيقة وعدم حدوثه في المرايا.

15. بأيّ معامل يمكنك تحسين قدرة التحليل، مع بقاء الأشياء الأخرى ثابتة، إذا استعملت ضوءًا أزرق $(\lambda = 450\,\text{nm})$ بدلاً من الأحمر $(\lambda = 700\,\text{nm})$؟

16. اذكر فائدتين على الأقلّ لاستعمال مرايا عاكسة كبيرة في التلسكوبات الفلكية؟

17. ما اللون في الضّوء المرئيّ الذي يعطي أفضل قدرة تحليل في المجهر؟ فسّر ذلك.

18. الذرات ذات قطر $10^{-8}\,\text{cm}$ تقريبا. هل يمكن استعمال الضّوء المرئيّ لرؤية ذرة؟ فسّر ذلك.

مسائــل

25 – 1 الكاميرات

1. (I) عدسة بعدها البؤريّ 55-mm، ولها حاجز – f يتراوح بين $f/1.4$ إلى $f/22$. ما مدى قطر حاجز العدسة المقابل؟

2. (I) عدسة كاميرا تلفزيونية بعدها البؤريّ 14-cm وقطر العدسة 6.0 cm. ما عدد - f لها؟

3. (I) مقياس ضوئيّ يظهر أنّ وضع الكاميرا $\frac{1}{250}\,\text{s}$ عند $f/5.6$ سوف يعطي تعرضا صحيحًا. ولكن المصور يريد استعمال $f/11$ لزيادة عمق المجال. ماذا ستكون سرعة المغلاق؟

4. (I) صورة معرضة بصورة صحيحة أخذت عند $f/16$، و $\frac{1}{60}\,\text{s}$. ما فتحة العدسة المطلوبة إذا كانت سرعة المغلاق $\frac{1}{1000}\,\text{s}$؟

5. (II) صمّمت عدسة تصوير بعدها البؤريّ $f = 135\text{-mm}$ لتغطي أبعاد الجسم من 1.2 m إلى ∞، ما المسافات التي سوف تتحرك خلالها نسبة إلى مستوى الفيلم؟

6. (II) عدسة بعدها البؤريّ 200-mm، يمكن ضبطها بحيث تكون عند 200.0 mm إلى 206.0 mm من الفيلم. ما مدى بُعد الجسم الذي تضبط لأجله؟

7. (II) يرغب مصور مناظر طبيعية تصوير شجرة طولها 28-m من مسافة 58 m. ما البُعد البؤريّ للعدسة المطلوب استعمالها إذا كان على الخيال أن يملأ فيلمًا ارتفاعه 24-mm؟

8. (II) تستعمل كاميرا ذات الثقب فتحةً ضيقة بدلا من العدسة. بيّن باستعمال مخططات شعاعية، كيفية تشكيل أخيلة معقولة الحدّة باستعمال مثل هذه الكاميرا. بشكل خاص، افترض جسمين نقطيّين، البُعد بينهما 2.0 cm وعلى بعد 1.0-mm من ثقب الكاميرا الذي قطره 1.0-mm. بيّن أنه لفيلم على بُعد 7.0 cm خلف الثقب يكوّن الجسمان دائرتين منفصلتين لا تتطابقان.

9. (III) افرض أنّ تعرضا صحيحا هو $\frac{1}{250}\,\text{s}$ عند $f/11$، و . تحت الظروف نفسها، ما وقت التعرض المطلوب لكاميرا ذات الثقب (السّؤال 8) إذا كان قطر الثقب 1.0 mm والفيلم يبعد 7.0 cm من الثقب؟

25 – 2 العين والعدسات المصحّحة

10. (I) حجرة عين إنسان طولها 2.0 cm، والقطر الأقصى للبؤبؤ نحو 8.0 mm. ما "سرعة" هذه العدسة؟

11. (I) إذا استعمل الشخص المُصابُ بقصرِ النّظرِ في (المثال 25-6) عدساتٍ لاصقةً مصحّحةً للنقطة البعيدة (∞ =)، فبين أنّ النّقطة القريبة ستكون 41 cm. (هل ستكون النظارات أفضل في هذه الحالة)؟

12. (II) نظارات قراءة، ما قدرتها المطلوبة لشخص، النّقطة القريبة له 115 cm بحيث يمكنه قراءة شاشة حاسوب عند 55 cm؟ افرض أنّ البعد بين العدسة والعين 1.8 cm.

13. (II) شخص له بعد النّقطة البعيدة 14 cm. ما قدرة العدسات اللازمة لتصحيح هذا النّظر إذا وضعت العدسات على بعد 2.0 cm من العين؟ ما قدرة العدسات اللاصقة الموضوعة على العين التي يحتاج إليها هذا الشخص؟

14. (II) يعاني شخص عندما يقرأ، فيمسك الكتاب على طول ذراعه، المسافة على بعد 45 cm (= النّقطة القريبة). ما قدرة عدسات النظارات المناسبة له، على فرض أنها ستكون موضوعة على بُعد 2.0 cm من العين، ويريد القراءة عند النّقطة القريبة الطبيعية 25 cm؟

15. (II) صُحِّحَتِ العينُ اليسرى لشخص بعدسة قدرتها 3.50-diopter−، على بعد 2.0 cm من العين. (أ) هل العين اليسرى لهذا الشخص قصيرة النّظر أم بعيدة النّظر؟ (ب) ما النّقطة البعيدة لهذه العين دون نظارات؟

16. (II) تستطيع العين اليمنى لشخص رؤية الأشياء بوضوح فقط إذا كانت بين 25 cm و 75 cm (أ) ما قدرة العدسة اللاصقة اللازمة بحيث تبدو الأجسام البعيدة واضحة؟ (ب) ماذا ستكون النّقطة القريبة بوجود العدسة في مكانها؟

17. (II) بكم أطول ستكون العين قصيرة النّظر في (المثال 25 – 6) من 2.0 cm للعين الطبيعية؟

18. (II) البعد البؤريّ لعدسة عين شخص قصير النّظر 22.0 cm−، وبعدها عن العين 1.8 cm. إذا استعمل الشخص عدسات ملتصقة بالعين، فماذا سيكون البعد البؤريّ للعدسة اللاصقة؟

19. (II) ما البعد البؤريّ لنظام العين – عدسة عند النّظر إلى: (أ) جسم في اللانهاية؟ (ب) جسم يبعد 33 cm من العين؟ افرض أنّ البعد بين العدسة والقرنية 2.0 cm.

20. (III) شخص قصير النّظر لديه النّقطة القريبة والنّقطة البعيدة على بعد 10.0 و 20.0 cm على الترتيب. إذا استعمل عدسات قدرتها $P = -4.00$ D. فما بُعد النقطتين القريبة والبعيدة الجديدتين؟

25 – 3 العدسة المكبّرة

21. (I) ما تكبير عدسة تستعمل لعين مرتخية بعدها البؤريّ 12 cm؟

22. (I) ما البعد البؤريّ لعدسة مكبرة تكبيرها 3.5× لعين طبيعية مرتخية؟

23. (I) عدسة مكبرة تكبيرها 2.5× لعين طبيعية تنظر إلى خيال عند النّقطة القريبة. (أ) ما بعدها البؤريّ؟ (ب) ما بعدها البؤريّ إذا كان التكبير 2.5× لعين مرتخية؟

24. (II) يستعمل شرلوك هولمز عدسة بعدها البؤريّ 9.00-cm كعدسة مكبرة. للحصول على أقصى تكبير، أين يجب وضع الجسم (افرض عينا طبيعية)؟ وكم سيكون التكبير عندئذٍ؟

25. (II) خنفساء عرضها 3.30-mm تشاهد عبر عدسة بعدها البؤريّ 9.50-cm. عين طبيعية تنظر إلى الخيال عند نقطتها القريبة. احسب: (أ) تكبيرها الزاوي. (ب) عرض الخيال. (ج) بعد الجسم عن العدسة.

26. (II) وضعت حشرة صغيرة على بعد 5.55 cm من عدسة بعدها البؤريّ 6.00-cm+. احسب: (أ) موقع الخيال. (ب) التكبير الزاوي.

27. (II) عدسة مكبرة بعدها البؤريّ 8.5 cm استعملت لقراءة مطبوعة موضوعة على بعد 7.5 cm. احسب: (أ) موقع الخيال. (ب) التكبير الزاوي.

28. (II) عدسة مكبرة تكبيرها 3.0× لعين طبيعية مرتخية. ماذا سيكون التكبير لهذه العدسة لعين مرتخية نقطتها القريبة: (أ)55 cm؟ (ب) 16 cm؟ فسّر الفروق.

25 – 4 التلسكوبات

29. (I) ما تكبير تلسكوب فلكيّ، البعد البؤريّ لشيئيته 76 cm، والبعد البؤريّ لعينيته 2.8 cm؟ ما الطول الكلي له عند ضبطه لعين مرتخية؟

30. يُراد أن يكون التكبيرُ الكلّيُّ لتلسكوب فلكي 25×. إذا استُعْمِلَتْ شيئيّةٌ بعدُها البؤريّ 78-cm، فماذا يجب أن يكون البعد البؤريّ للعينية؟ ما الطول الكلي للتلسكوب عند ضبطه لعين مرتخية؟

31. (I) تلسكوبٌ مزدوج قوة تكبيره 8.0×، والبعد البؤريّ لعينيته 2.8-cm. ما هو البعد البؤريّ للشيئية؟

32. (II) تلسكوبٌ فلكيّ له شيئية بعدها البؤريّ 85cm، وعينية قدرتها 35-D+. ما تكبيره الكليّ؟

33. (II) تلسكوب فلكيّ البعد بين عدستيه 75.2 cm. إذا كان البعد البؤريّ لشيئيته 74.5 cm، فما تكبيره؟ افرض أنّ العين مرتخية.

34. (II) ضُبط تلسكوب جاليليو لعين مرتخية فكان طوله 32.8 cm. إذا كان البعد البؤريّ للشيئية 36.0 cm، فما تكبيره؟

35. (II) ما قدرة التكبير لتلسكوب فلكيّ يستخدم مرآة عاكسة نصف قطر تكورها 6.0 m، وعدسة عينية بعدها البؤريّ 3.2 cm؟

36. (II) يبدو خيال القمر مكبّرًا 120× بتلسكوب فلكيّ عاكس البعد البؤريّ لعينيته 3.2 cm. فما البعد البؤريّ ونصف قطر التّكوّر لمرآته الرئيسة (الشّيئيّة)؟

37. (II) تمّ ضبط تلسكوب فلكي تكبيره 170× لعين مرتخية عندما كانت عدستاه على بعد 1.25 m من بعضهما. ما البعد البؤريّ لكلّ عدسة؟

38. (II) تلسكوب عاكس (الشّكل 25 – 21 ب) نصف قطر مرآته الشّيئيّة 3.0 m ونصف قطر تكور مرآته العينيّة 1.50 m−. إذا كان البعد بين المرآتين 0.90 m، فما البعد أمام العينيّة الذي يجب وضع الفيلم عنده لتسجيل خيال نجم؟

*25 – 5 المجهر

***39.** (I) يُستعمل مجهر عينية بعدها البؤريّ 1.40 cm. باستعمال عين طبيعية بخيال في اللانهاية، يكون طول الأنبوب 17.5 cm، والبعد البؤريّ للشيئية 0.65 cm. ما تكبير هذا المجهر؟

*40. (I) يُستخدم مجهرٌ قوة تكبيره ×620 شيئية بعدها البؤريّ 0.40-cm. إذا كان طول الأنبوب 17.5 cm، فما البعد البؤريّ للعينية؟ افرض عينا طبيعية والخيال النهائي في اللانهاية.

*41. (I) مجهر طوله 17-cm، البعد البؤريّ لعينيته 2.5 cm ولشيئيته 0.28 cm. ما تكبيره التقريبيّ؟

*42. (II) مجهر، قوة تكبير العينيّة له ×12.0 والشّيئيّة ×59.0 ، والبعد بينهما 20.0 cm. احسب: (أ) التكبير الكلي. (ب) البعد البؤريّ لكلّ عدسة. و أين يجب وضع الجسم لعين طبيعية مرتخية لتراه في البؤرة؟

*43. (II) مجهر، البعد البؤريّ لعينيته 1.8-cm، ولشيئيته 0.80-cm افرض عينا طبيعية مرتخية، احسب: (أ) موقع الجسم إذا كان البعد بين العدستين 16.0 cm. (ب) التكبير الكلّيّ.

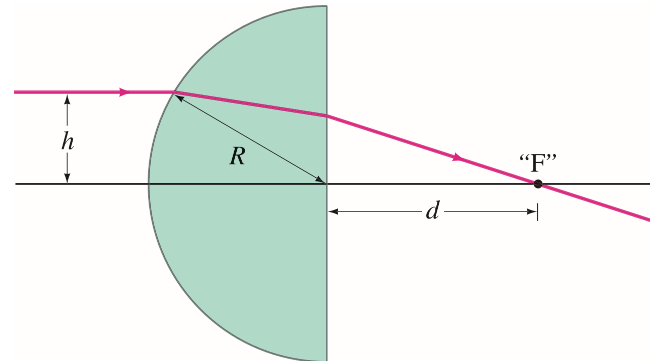
*44. (II) أعد حلّ (المسألة 43) على افتراض أنّ الخيال النهائيّ عند25cm من العينيّة (أقرب نقطة لعين طبيعية).

*45. (II) مجهر مركب، البعد البؤريّ لعينيته 2.70 cm، ولشيئيته f = 0.740 cm. إذا وضع جسم 0.790 cm من العدسة الشّيئيّة، فاحسب: (أ) البعد بين العدستين عندما يضبط المجهر لعين مرتخية (ب) التكبير الكلّيّ.

*25 – 6 الزّيغانات

*46. (II) عدسة عديمة الزّيغ اللونيّ مصنوعة من عدستين رقيقتين متلاصقتين، بعداهما البؤريّان $f_1 = -28\text{ cm}$، و $f_2 = +23\text{ cm}$. (أ) هل التركيب مجمّع أم مفرّق؟ (ب) ما هو البعد البؤريّ الكلّيّ؟

47. (III) دعنا نتفحص الزّيغ الكرويّ في وضع معين. عدسة مستوية محدبة معامل انكسارها 1.50، ونصف قطر تكورها $R = 12.0\text{ cm}$ مبينة في (الشّكل 25 – 48). خذ شعاعًا قادمًا موازيًا للمحور الرّئيس، ويبعد عنه مسافة h كما هو مبين. احسب المسافة d، من السّطح المستوي للعدسة الذي يقطع فيه هذا الشّعاع المحور الرّئيس إذا: (أ) $h = 1.0\text{ cm}$ (ب) $h = 6.0\text{ cm}$ (ج) ما البعد بين هاتين البؤرتين؟ (د) ما نصف قطر "دائرة التشويش الصغرى" الناتجة من شعاع $h = 6.0\text{-cm}$ عند "البؤرة" لـ $h = 1.0\text{ cm}$؟



الشّكل 25 - 48 (مسألة 47)

25 – 7 إلى 25 – 9 قدرة التحليل

48. (I) ما حدود قدرة التحليل (بالدرجات) التي يضعها الحيود على منظار ويلسون ذي 100-in (254-cm) قطر المرآة) و ($\lambda = 550\text{ nm}$)؟

49. (II) افرض أنك تريد بناء تلسكوب يمكنه تحليل معالم البعد بينها 7.0 km على القمر الذي يبعد عنا 384,000 km. لديك شيئية بعدها البؤريّ 2.0-m وقطرها 11.0 cm. ما البعد البؤريّ للعينية اللازم إذا كانت عينك تستطيع تحليل أجسام البعد بينها 0.10 mm عند بعد 25 cm؟ ما حدود قدرة التحليل (بالراديان) الذي يضعه حجم العدسة الشّيئيّة (أي بالحيود)؟ استخدم $\lambda = 550\text{ nm}$

50. (II) العدسة العادية في كاميرا 35-mm، بعدها البؤريّ 50.0 mm. قطر فتحتها يتغير من ($f/2$) 25 mm إلى 3.0 mm ($f/16$). احسب قدرة التحليل التي يضعها الحيود لـ $f/2$، و $f/16$. حدّد عدد الخطوط لكلّ 1mm التي تحلل على الفيلم. خذ $\lambda = 550\text{ nm}$.

51. (II) نجمان يبعدان 15 سنة ضوئية أمكن تحليلهما بتلسكوب (قطر المرآة) 55-cm. ما البعد بين النجمين؟ افرض أنّ $\lambda = 550\text{ nm}$، وأنّ التحليل يفرضه الحيود.

52. (II) (أ) على أيّ بعد تستطيع عين الإنسان أن تميز مصباحي سيارة البعد بينهما 2.0 m؟ اعتبر الحيود فقط ، وافرض أنّ قطر بؤبؤ العين 5.0 mm، وطول موجة الضّوء 550 nm. (ب) ما البعد الزّاويّ الأدنى الذي تستطيع العين تحليله عند النّظر إلى نجمين، باعتبار آثار الحيود فقط ؟ في الواقع الجواب نحو 1′ قوسيَّة. لماذا لا يساوي جوابك في (ب)؟

53. (II) البعد بين الأرض والقمر نحو $400 \times 10^6\text{ m}$. عندما يكون المريخ على بعد $8 \times 10^{10}\text{ m}$ من الأرض، هل يستطيع شخص يقف على المريخ أن يحلل الأرض وقمرها كجسمين منفصلين دون تلسكوب؟ افرض قطر البؤبؤ 5 mm وطول موجة الضّوء $\lambda = 550\text{ nm}$.

*25 – 11 الأشعّة - X

*54. (II) تسقط أشعة – X طول موجتها 0.133 nm على بلورة ذراتها في مستويات البعد بينها 0.280 nm. عند أيّ زاوية ϕ (نسبة إلى السّطح، الشّكل 25 – 37) يجب توجيه الأشعّة – X إذا أردنا رؤية أول قمة حيود؟

*55. (II) أسقطت أشعة X – طول موجتها 0.0973 nm على بلورة مجهولة. قمة الحيود الثانية تظهر عندما تسقط الأشعّة – X بزاوية 23.4° نسبة إلى سطح البلورة. ما البعد بين مستويات البلورة؟

*56. (II) يشاهد حيود براغ ذي الرتبة 1 عند زاوية 25.2° نسبة إلى سطح البلورة، حيث البعد بين الذرات 0.24 nm. (أ) عند أيّ زاوية سوف نشاهد قمة الحيود الثانية؟ (ب) ما طول موجة الأشعّة – X المستعملة؟

*25 – 12 التّصوير الطّبقيّ المحوسب

*57. (II) (أ) افرض لخيال أشعة – X العاديّ أنّ حزمة الأشعّة – X مكونة من أشعة متوازية. ماذا سيكون تكبير الخيال؟ (ب) افرض بدلا من ذلك أنّ الأشعّة قادمة من مصدر نقطيّ (كما في الشّكل 25 – 41) على بعد 15 cm أمام جسم إنسان سمكه 25 cm، وأنّ الفيلم مضغوط على ظهر الشخص، احسب مدى التكبيرات الناتجة وناقشها.

مسائل عامة

58. يضع آدم نظارات +3.50-diopter لتصحيح عيب نظره كي يضع النّقطة القريبة على بعد 25 cm. (افرض أنّه يضع العدسات على بعد 2.0 cm من العين). (أ) احسب البعد البؤريّ لعدسات آدم. (ب) احسب النّقطة القريبة لآدم قبل النظارات. (ج) استعمل موسى، الذي عيناه طبيعيتان بأقرب نقطة عند 25 cm، نظارة آدم. احسب اقرب نقطة للرؤية الواضحة لموسى بنظارات آدم.

59. مرّ الصباح الباكر نحو منتصف النهار، وزادت شدّة الضّوء، لاحظت مصورة أنّه إذا حافظت على سرعة المغلاق للكاميرا ثابتة، فإنّ عليها أن تغير العدد-f من $f/5.6$ إلى $f/22$. بأيّ نسبة زادت شدّة ضوء النهار خلال هذا الوقت؟

60. بيّن أنه بالنسبة لأجسام بعيدة جدًّا (في اللانهاية)، يتناسب تكبير عدسة كاميرا مع بعدها البؤريّ.

61. كاميرا مزودة بعدسة، بُعدها البؤريّ 50-mm، ما بُعد الجسم إذا كان طول الخيال مساويًا لطول الجسم؟ ما بعد الجسم عن الفيلم؟

62. تستطيع سيدة أن ترى بوضوح بعينها اليمنى فقط عندما تكون الأجسام بين 45 cm و 155 cm بعيدة عن العين. ما القدرتان لعدسة ذات بؤرتين تستعملهما السيدة كي ترى الأجسام البعيدة بوضوح (الجزء العلوي)، وتكون قادرة على قراءة كتاب يبعد 25 cm (الجزء السفلي) بعينها اليمنى؟ افرض أنّ العدسة ستكون على بعد 2.0 cm من العين.

63. النّقطة القريبة لطفل 15 cm. ما أكبر تكبير يستطيع هذا الطفل أن يحققه باستعمال عدسة مكبرة بعدها البؤريّ 8.0-cm؟ ما التكبير الذي تستطيع عين طبيعية وصوله بالعدسة نفسها. أيّ الشخصين يرى تفاصيل أكثر؟

64. ما قدرة التكبير لعدسة +4.0-D عند استعمالها كمكبر؟ افرض عينا مرتخية طبيعية.

65. ضاع فيزيائي في الجبال، وحاول أن يصنع منظارًا باستعمال عدستي نظارته المخصصة للقراءة. لهما قدرة +2.0 D، و +4.5 D على الترتيب. (أ) ما أكبر قوة تكبير للمنظار يمكن الحصول عليها؟ (ب) أيّ العدستين سوف تستعمل عيناه؟

66. يستعمل رجل عمره 50 سنة عدسات قدرتها +2.5-diopter لقراءة الصحيفة الإخبارية على بعد 25 cm. بعد 10 سنوات، يجب عليه أن يمسك الصحيفة على بعد 35 cm ليرى بوضوح باستعمال العدسات نفسها. ما قدرة العدسات اللازمة الآن ليحمل الصحيفة على بعد 25 cm؟ (تقاس المسافات من العدسات).

67. تحلّق طائرات التَّجَسُّس على ارتفاعات شاهقة (25 km) لتجنب الاعتراض. وتستطيع آلات التّصوير فيها الكشف عن معالم صغيرة بحدود 5 cm. ماذا يجب أن تكون أصغر فتحة لعدسة الكاميرا لتعطي قدرة التحليل هذه؟ (استعمل $\lambda = 550$ nm).

68. عند التقاط صور على مسافات قريبة جدًّا، يجب زيادة زمن التعريض نظرًا لزيادة المسافة بين العدسة والفيلم. (أ) بيّن أنه عندما يكون الجسم قريب جدًّا من الكاميرا لدرجة أنّ طول الخيال يساوي طول الجسم، يجب أن يكون زمن التعريض أطول بأربع مرات (أو حاجز - $2f$) مما لو كان الجسم على بعد كبير جدًّا (لنقل ∞)، مع الإضاءة نفسها وحاجز-f . (ب) بين أنّه إذا كانت d_o على أقلّ أربع أو خمس مرات من البعد البؤريّ f للعدسة، يزاد زمن التعريض بمقدار أقلّ من نصف حاجز-f نسبة إلى الجسم نفسه عندما يكون على مسافة كبيرة جدًّا.

69. البعد بين الشّيئيّة والعينيّة لتلسكوب هو 85 cm. إذا كانت قدرة العينيّة +23 diopters، فما التكبير الكلي للتلسكوب؟

70. يستعمل تلسكوب هَبِلْ الفلكي، مع قطر الشّيئيّة 2.4 m، لمراقبة القمر. قدّر أقلّ مسافة بين جسمين على القمر يمكن لـ هَبِلْ أن يميزهما. اعتبر حيود ضوء طول موجته 550 nm. افرض أنّ هَبِلْ قريب من الأرض.

71. عدستان لامتان؛ الأولى لها $f = 4.0$ cm، والثانية لها $f = 44$ cm، عمل منهما منظار. (أ) ما طول المنظار وتكبيره؟ أيّ العدستين منهما ستكون العينيّة؟ (ب) افرض أنّ العدستين ركبتا لعمل مجهر؛ إذا كان التكبير المطلوب ×25، فكم سيكون طول المجهر؟

72. تلسكوب فلكيّ تكبيره 8.0. إذا كان البعد بين العدستين 28 cm ، فحدّد البُعد البؤريّ لكلّ منهما.

73. إذا أردت أن تصمم قمر تجسس لتصور أرقام لوحات إجازة السّير. بغرض أنه من الضروري تحليل نقاط مبتعدة 5 cm بضوء طول موجته 550-nm، وأنّ القمر يدور على ارتفاع 130 km، ما قطر العدسة المطلوب؟

74.* عدسة Lucite المستوية المحدبة (الشّكل 29 – 23 أ) لها سطح مستوٍ والآخر له $R = 18.4$ cm. تستعمل هذه العدسة لمراقبة جسم موضوع على بعد 66.0 cm منها، الجسم مزيج من الأحمر والأصفر. معامل انكسار الزجاج 1.5106 للضوء الأحمر و 1.5226 للضوء الأصفر. ما مواضع خيالي الأحمر والأصفر المتكوّنين بوساطة العدسة؟

إجابات التمارين

أ: 6.3 m

ب: $P = -4.0$ D

جـ: 48 cm

د: 2 m

تخيّل العالِمُ الفيزيائيّ ''جورج جامو''في كتابٍ قديمٍ للخيال العلميّ (1940)، بعنوان ''السّيد تومبكن في بلاد العجائب''، أنّ سرعة الضوء في عالم ما هي $10\,\mathrm{m/s}$ $(20\,\mathrm{mi/h})$. درس السيّدُ تومبكن النسبيّة، وعندما بدأ ''يُسرِعُ'' على دراجته ''توقع أن تقصر قامته على الفور، وقد كان سعيدًا بذلك حيث كانت قامته الطويلة تسبّبُ له بعض المتاعب. ومع هذا، ولدهشته الكبيرة، لم يحدث أيّ شيء من توقعاته. وعلى الوجه الآخر، فقد تغيّرت الصورة حوله تمامًا. فظهرت الشوارع أقصر، وشبابيك المتاجر كشقوقٍ ضيّقةٍ، أمّا الشرطيّ عند الناصية، فظهر وكأنه أنحفُ رجلٍ رآه في حياته. فصاح بدهشةٍ قائلاً: الآن توضحت الصورة. من هنا تأتي كلمة النسبية''. وبالفعل،تتنبأ النسبيّة بأنّ الأجسامَ التي تتحرّكُ بسرعاتٍ عاليةٍ بالنسبة لنا،قريبة من سرعةِ الضوء، تقلّ أطوالها. ولا نلاحظها كما لاحظها السيد تومبكن؛ لأنّ سرعة الضوء، $c = 3 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$، هي سرعة عالية جدّا. وسوف ندرسُ تقلّص الطول، وتمدّد الزمن، والتزامن غير المتفق، وكيفية تكافؤ الطاقة والكتلة $(E = mc^{2})$.



الفصل 26

نظريّة النسبيّة الخاصّة

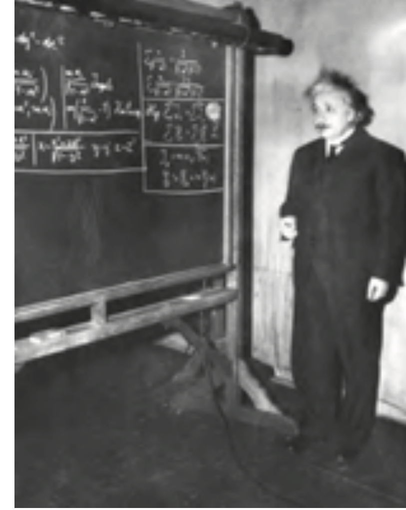
لو نظرت الفيزياءُ في نهايةِ القرن التاسع عشر إلى الخلفِ لرأت فترة من التطوّر الهائل. لقد نجحت النظريات التي طوّرت خلال القرون الثلاثة الماضية في تفسير كمّ هائلٍ من الظواهر الطبيعية. ففسّرت الميكانيكا التقليدية (ميكانيكا نيوتن) حركة الأجسام على الأرض وفي الفضاء بشكل جميل. إضافة إلى ذلك، فقد شكلت الأساس للمعالجات الناجحة للموائع، والحركة الموجية، والصوت. في حين فسّرت النظرية الحركية تصرف الغازات والمواد الأخرى.وكانت نظريّة ماكسويل قادرة على دمج ظاهرتي الكهرباء والمغناطيسية وتفسيرهما، وكذلك التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية التي تتصرف بطرق مشابهة لتصرف الضوء، ممّا عزّز من فكرة التعامل مع الضوء كموجة كهرومغناطيسية.

وقد ظهر العالمُ الحقيقيّ، في بادئ الأمر كما تمّ رؤيته بأعين الفيزيائيين على أنّه قابلٌ للتفسير بشكلٍ جيّدٍ. وبقيت بعضُ الأمور المحيرّة عالقة. ومع هذا، فقد كان الشعورُ السائدُ آنذاك أنها ستحلّ خلال وقتٍ قصير باستخدام المفاهيم المعروفة في حينه.

ولكن، اتضح فيما بعد أنّ هذه الأمور المحيرة هي أمور غير بسيطة. ولذلك، فلم يكن حلُّها ممكنًا دون إدخال نظريتين حديثتين ثوريتين في بداية القرن العشرين، واللتين غيّرتا إدراكنا الكلي للطبيعة. والنظريتان هما: النظريّة النسبيّة والنظريّة الكميّة.

الفيزياء التقليدية مقابل الحديثة

ويُشارُ إلى الفيزياءِ التي كانت معروفة حتى القرن التاسع عشر (والتي قمنا بشرحها في هذا الكتاب إلى الآن) بـ **الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية)**. في حين تدعى الفيزياءُ الجديدة التي نتجت من الثورةِ العلميّةِ الهائلةِ عند بدايةِ القرن العشرين **الفيزياء الحديثة**. وسوف نقدّمُ في هذا الفصل نظريّة النسبيّة الخاصّة التي تقدّمَ باقتراحها لأوّل مرّةٍ ألبرت آينشتاين (1879 – 1955، الشكل 26–1) في عام 1905. وسنقدّمُ في (الفصل 27) النظريّة الكميّة والمساوية في الأهميّة لسابقتها



الشكل **26-1** ألبرت آينشتاين (1879 - 1955) أحد ألمع العقول المفكرة في القرن العشرين وصاحب النظريتين النسبيّة العامّة والنسبيّة الخاصّة.

1-26 نسبيّة جاليليو ونيوتن

إطار مرجعي قصوري

تتعاملُ نظريّة النسبيّة الخاصّة لآينشتاين مع كيفية ملاحظتنا للأحداث، وتحديدًا كيف نلاحظ الأجسام والأحداث من خلال الأطر المرجعيّة المختلفة.* ولقد تمّ استكشافُ هذا الموضوع بالطبع من قبل كلّ من جاليليو ونيوتن. وتتعاملُ النظريّة النسبيّة الخاصّة مع أحداثٍ تمّت ملاحظتها وقياسها فيما يُسمّى **أطرا مرجعية قصورية** (نوقشت في الفصل الرابع) وهي أطر مرجعية ينطبق عليها قانون نيوتن الأول: إذا لم يتأثر الجسم بأي قوّة، فسيبقى على حالته من السكون أو يستمر في حركتهِ بسرعةٍ ثابتةٍ وفي خط مستقيم. وتعدّ أسهلُ طريقة لذلك هي تحليل الأحداث عند ملاحظتها وقياسها من أطر مرجعية قصورية. ومع أنّ الأرضَ لا تعدّ إطارًا قصوريًّا (بسبب دورانها) إلا أنّها قد تُعدّ تقريبًا كذلك لمعظم التطبيقات. وتعدّ الأطر المرجعيّة الدّورانيّة أو المتسارعة أطراغير قصوريّة** حيث لن نكترث لها في هذا الفصل، وسيتمّ التعامل معها في نظريّة آينشتاين النسبيّة العامّة في (البند 33–4).

* الإطارُ المرجعيّ عبارة عن مجموعة من المحاور الإحداثية المثبتة لجسم ما مثل الأرض، أو القطار، أو حتى القمر. (انظر البند 2–1).

** على منصة دورانية (كدوامة الأحصنة في مدينة ترفيهية)، على سبيل المثال، حيث يبدأ الجسم الساكن بالحركة نحو الخارج بالرغم من عدم تأثره بأي قوة. ولذلك فلا يعدّ هذا إطاراً قصورياً. انظر الفهرس جـ الشكل جـ - 1.

يُعدّ الإطارُ المرجعيُّ الذي يتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لإطار قصوري، أيضًا إطارًا قصوريًّا نظرًا لصمود قوانين نيوتن من خلاله. وعندما نقول بأنّنا قمنا بالملاحظة أو أخذ قراءات من خلال إطار مرجعي معين، فهذا يعني أننا كنا ساكنين في ذلك الإطار المرجعي.

وكان كلّ من جاليليو ونيوتن مدركَيْن لما ندعوه الآن تطبيق **مبدأ النسبيّة** على الميكانيكا: أي أنّ قوانين الفيزياء الأساسية هي نفسها، ولا تتغيّر في الأطر المرجعية القصورية جميعها. وقد تكون قد لاحظت صحة ذلك في الحياة اليومية. فعلى سبيل المثال، تتحرّك الأجسام داخل قطار أو طائرة، يتحرك كلّ منهما بصورة سلسلة (بسرعة ثابتة)، بالطريقة نفسها التي تتحرّك بها على الأرض. (وهذا على افتراض عدم وجود أيّ اهتزاز أو تأرجح يعمل على جعل الإطار المرجعي غير قصوري). وعندما تمشي أو تتناول كوبًا من الحساء، أو تلعب البليياردو، أو تسقط قلمًا على الأرض وأنت تسافر في قطار أو طائرة أو سفينة يتحرك كلٌّ منهم بسرعة ثابتة، فإنّ الأجسام ستتحرك كما لو كانت ستتحرك لو كنت ساكنا على الأرض. ما طريقة سقوط القطعة النقدية الفلزية إذا تركتها تسقط من أعلى رأسك وأنت تجلس في سيارة تسير بسرعة عالية ثابتة؟ بالطبع ستسقط إلى الأسفل مباشرة داخل السيارة المتحركة بسرعة ثابتة وستصطدم بأرض السيارة أسفل النقطة التي سقطت منها، (الشكل 26–2 أ). (أمّا إذا سقطت القطعة النقدية الفلزية خارج نافذة السيارة، فإنّها لن تسقط إلى الأرض كما في الحالة السابقة، بل سيعمل الهواء على سحبها إلى الخلف بالنسبة إلى السيارة). وهذه طريقة سقوط الأجسام على الأرض – مباشرة نحو الأسفل؛ لذا فإنّ تجربتنا داخل السيارة المتحركة تخضع لمبدأ النسبيّة.

مبدأ النسبيّة:
تبقى قوانين الفيزياء ولا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها.

الشكل 26-2 سقوط قطعة نقدية من شخص ما داخل سيارة متحركة. وتظهر الرسومات العلوية لحظة سقوط القطعة النقدية، في حين تظهر الرسومات السفلية ما يحدث بعد عدة لحظات. (أ) تسقط القطعة النقدية الفلزية مباشرة نحو الأسفل حسب الإطار المرجعي للسيارة. (ب) تسقط القطعة النقدية بشكل مسار منحن (قطع مكافئ) حسب إطار مرجعي مثبت على الأرض.



(أ) الإطار المرجعي = السيارة

(ب) الإطار المرجعي = الأرض

ولاحظ على أيّ حال، في هذا المثال، بأنّ القطعة النقدية لمراقب على الأرض ستتبع مسارًا منحنيًا كما في (الشكل 26–2ب). وأنّ المسار الفعلي للقطعة النقدية سيظهر مختلفا عند رؤيته من أطر مرجعية مختلفة. وهذا لا يتعارض مع مبدأ النسبيّة؛ لأنّ هذا المبدأ ينصّ على أنّ قوانين الفيزياء لن تتغير في الأطر القصورية جميعها. وستنطبق قوانين الحركة نفسها وقانون الجاذبية في الإطارين المرجعيين السابقين. وتسارع القطعة النقدية هو ذاته في هذين الإطارين المرجعيين. أمّا الاختلاف في (الشكلين 26–2 أ و ب) فينحصر في سرعة القطعة النقدية الابتدائية (والمساوية لسرعة السيارة) بالنسبة إلى إطار الأرض المرجعي. وبذلك، فإنّ قوانين الفيزياء ستتنبأ بتتبع القطعة النقدية مسار قطع ناقص كما في المقذوفات (الفصل الثالث). أمّا في إطار السيارة المرجعي، فلا توجد سرعة ابتدائية للقطعة النقدية، ولذلك ستتنبأ قوانين الفيزياء بأنّ القطعة النقدية ستسقط مباشرة نحو الأسفل. ولهذا، فإنّ قوانين الفيزياء هي نفسها، ولن تتغيّر في الإطارين المرجعيين بالرغم من اختلاف مساري القطعة النقدية.

تنويه !
تبقى القوانين نفسها، ولكن قد تتغير المسارات في الأطر المرجعية المختلفة.

تشتملُ نسبيّة جاليليو ونيوتن على بعض الفرضيّات غير المثبتة، والتي تُعدّ منطقية حسب الممارسات اليومية. فلقد افترض أنّ أطوال الأجسام ثابتةً لا تتغيّر بتغيّر الإطار المرجعي، وأنّ معدل مرور الزمن لا يتغير أيضًا بتغير هذا الإطار المرجعي. وبناءً على ذلك، فإنّ المكان والفترات الزمنية تُعدّ مطلقة؛ أي لا يتغير قياسها من إطار مرجعي إلى آخر. إضافة إلى ذلك، فقد تمّ اعتبار الكتلة والقوى جميعها على أنها لا تتغير مع تغير الإطار المرجعي القصوري.

تنويه !
الموضع والسرعة يختلفان باختلاف الأطر المرجعية، ولكن الطول يبقى كما هو (تقليديا)

ومع هذا، فإنّ موضع الجسم وسرعته سيختلفان عندما ينظر إليهما من عدة أطر مرجعية مختلفة. فعلى سبيل المثال، يمكن لشخص ما يتحرك داخل حافلة باتجاه مقدمتها بسرعة 2 m/s. فإذا تحركت الحافلة بسرعة 10 m/s بالنسبة إلى الأرض، فستصبح سرعة الشخص 12 m/s بالنسبة إلى الأرض. ومع هذا، فإنّ تسارع الجسم هو نفسه في أيّ إطار مرجعي قصوري بحسب الفيزياء التقليدية. وهذا ناجم عن عدم تغير مقدار السرعة والفترة الزمنية عند قياسهما بالنسبة إلى عدّة أُطر مرجعية. وفيما يلي مثال على ذلك: عندما يتسارع شخص ما في حافلة من صفر إلى 2 m/s خلال ثانية واحدة، فإنّ تسارعه $a = 2\,\text{m/s}^2$ بالنسبة إلى إطار الحافلة المرجعي. وكذلك بالنسبة إلى الأرض فإنّ تسارعه:

$$\frac{(12\,\text{m/s} - 10\,\text{m/s})}{1.0\,\text{s}} = 2\,\text{m/s}^2$$

وهو تمامًا كما نتج سابقًا.

وبما أنّ كلًّا من F، و m، و a لا يتغيّر من إطارٍ مرجعي إلى آخر، فإنّ قانون نيوتن الثاني $F = ma$ لن يتغيرهو أيضًا. وعليه، فإنّ قانون نيوتن الثاني يحقق مبدأ النسبيّة. ومن السهولة إثبات تحقيق قوانين الميكانيكا الأخرى لمبدأ النسبيّة.

الأطر المرجعية القصورية جميعها صحيحة بالتساوي.

وبما أنّ قوانين الميكانيكا تبقى ثابتة ولا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها، فإنّ هذا يوحي بعدم خصوصيّة أو تميز أيّ إطار مرجعي بالنسبة إلى الأطر الأخرى. ونعبّر عن هذا الاستنتاج المهمّ بأنّ **الأطر المرجعية القصورية جميعها متكافئة** في وصفها للظواهر الميكانيكية. وليس هناك أيّ إطار مرجعي قصوري أفضل من الآخر. فالإطار المرجعي المثبت في سيارة، أو طائرة، يتحرك كلّ منهما بسرعة ثابتة يكون بالجودة نفسها لإطار مثبت على الأرض. وعندما تتحرك بسرعة ثابتة بسلاسة في سيارة أو طائرة، فمن الصحة أيضا أن تقول بأنك ساكن، وبأنّ الأرض تتحرك. تماماً مثل صحة قولك عكس ذلك. ولا توجد هناك أيّ تجربة تستطيع أن تجريها لتستنتج منها أيّ إطار منهما هو الساكن في الحقيقة وأيّا منهما المتحرك. وعليه، فليس هناك أيّ وسيلة لاختيار إطار مرجعي محدّد ليكون عند السكون المطلق.

ومع هذا، فقد برزت بعض التعقيدات في النصف الأخير من القرن التاسع عشر. فقد تنبأت نظريّة ماكسويل الشاملة والناجحة في الكهرباء والمغناطيسية (الفصل 22) بأنّ الضوء ما هو إلّا موجة كهرومغناطيسية. وأعطت معادلات ماكسويل سرعة الضوء c على أنّها $3.00 \times 10^8\,\text{m/s}$ وهذا ما تمّ قياسه تماما ضمن حدود الأخطاء العملية. ليبرز عندئذ السؤال الآتي: في أيّ إطار مرجعي يمتلكُ الضوءُ تماما القيمة التي تنبأت بها نظرية ماكسويل؟ وكان يفترض في السابق أنّ الضّوءَ يمتلك سرعاتٍ مختلفة في الأطر المرجعية المختلفة. وعلى سبيل المثال، إذا كان المراقبون يتحركون بسفينةٍ صاروخيةٍ بسرعةٍ $1.0 \times 10^8\,\text{m/s}$ مبتعدين عن مصدر ضوءٍ، فمن المتوقع أنْ يقيسوا سرعة الضوء القادمة باتجاههم لتكون:

$$(3.0 \times 10^8\,\text{m/s}) - (1.0 \times 10^8\,\text{m/s}) = 2.0 \times 10^8\,\text{m/s}$$

ولكن لا يوجد أيّ موضع للسرعة النسبيّة في معادلات ماكسويل. وتنبأت هذه المعادلات بأنّ سرعة الضوء: $c = 3.0 \times 10^8\,\text{m/s}$. وظهر هذا وكأنه يُوحي بوجود إطار مرجعيّ خاص يمنح c هذه القيمة.

"الأثير"

لقد ذكرنا في (الفصلين 11 و 12) الأمواج، وكيف يمكنها أن تنتقل على المياه وعلى امتداد الحبال، وكيف يمكن للأمواج الصوتية أن تنتقل في الهواء وخلال مواد أخرى. لقد رأى فيزيائيوالقرن التاسع عشر العالم الماديّ من خلال قوانين الميكانيكا، فأصبح من الطبيعي الافتراض بضرورة انتقال الضوء خلال وسط ما. وقد أطلقوا على هذا الوسط الشفاف **الأثير**، وافترضوا أنّه يملأ الفضاء كلّه.* وبناءً على ذلك، فقد افترض أنّ سرعة الضوء المبينة في معادلات ماكسويل هي بالنسبة للأثير.

لقد ظهر في البداية وكأنّ معادلات ماكسويل لا تحقق مبدأ النسبيّة. وكانت هذه المعادلات تظهرُ في أبسطِ صورها عندما تكون سرعة الضوء $c = 3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$، أي عندما تكون سرعة الضوء في إطار مرجعيّ ساكن في الأثير. ويترتبُ على ذلك إضافة عدة حدودٍ أخرى لتعكس حركة الإطار المرجعي عندما يتحركُ بسرعةٍ نسبيّة. ونتيجة لذلك، وبالرغم من أنّ معظم قوانين الفيزياء تحققُ مبدأالنسبيّة، إلا أنّ قوانين الكهرباء المغناطيسية ظهرت وكأنّها لا تخضعُ لقوانين النسبيّة. (مُسلمّة آينشتاين الثانية —انظر البند التالي— قدمت حلاً لهذه المعضلة: إنّ معادلات ماكسويل تحقق النسبيّة بالفعل).

تجربة مايكلسون ومورلي

وعَمِدَ العُلماءُ عندئذٍ إلى تحديدِ سرعةِ الأرض بالنسبة إلى هذا الإطار المُطلق مهما كانت طبيعته. وتمّ تصميم عددٍ من التجارب الذكيّة. وكان أكثرُها توجّها لخدمة هذا الهدف التجربة التي قام بها كلّ من مايكلسون ومورلي في ثمانينيّات القرن التاسع عشر (1880). وقاما بقياس الفرق في سرعة الضوء في عدّة اتجاهاتٍ باستخدام جهاز مقياس التداخل لمايكلسون (البند 24–9). وتوقعا أن يجدا فرقًا اعتمادًا على اتجاه آلتهم بالنسبة إلى الأثير. وبما أنّ القارب سيظهر عدة سرعات مختلفة بالنسبة إلى الأرض عندما يتحرك مع التيار أو ضده أو عموديا عليه، فإنّ من المتوقع أيضا أن يُبديَ الضوءُ عدة سرعات اعتمادا على سرعة الأثير في ما بعد الأرض.

النتيجة الخاوية.

ومع غرابة الأمر، لم يستطيعا قياس أيّ اختلافٍ نهائيّا. وكان هذا لغزا كبيرا، وتمّ وضعُ عدة تفاسير خلال فترة زمنيّة امتدت لسنوات أدّت إلى خلق تناقضات، أو إلى عدم قبول بشكل عام. وكانت هذه **النتيجة الخاوية** واحدة من أكبر الألغاز في نهاية القرن التاسع عشر.

وبعد ذلك، في عام 1905، اقترح ألبرت آينشتاين نظريّة حديثة فريدة عالجت هذه المعضلات جميعها بطريقة بسيطة. ولكنها في الوقت نفسه، كما سنرى، غيرت بشكل كامل أفكارنا عن الزمان والمكان.

26-2 مُسلمّات نظريّة النسبيّة الخاصّة

لقد تمّ حلّ المعضلات التي كانت موجودة في بداية القرن العشرين، والمتعلّقة بالميكانيكا النيوتونية وبنظرية الكهرباء والمغناطيسية بطريقة حسنة بتقديم آينشتاين لنظريّة النسبيّة في عام 1905. ولم يكن آينشتاين على دراية بالنتيجة الخاوية لمايكلسون وموري، وكان الدافع وراء عمل آينشتاين الإجابة عن أسئلة محددة بالنسبة لنظرية الكهرباء والمغناطيسية، والأمواج الضوئية. وعلى سبيل المثال، فقد سأل آينشتاين نفسه: "ماذا سأرى إذا ما امتطيت شعاعا ضوئيا؟" وكانت الإجابة أنّه بدلاً من موجة كهرومغناطيسية متحركة، فإنّه سيرى مجالين (كهربائيّ ومغناطيسيّ) مترددين ساكنين تغيرت قيمتاهما في الفراغ، ولم تتغيرا مع الزمن. وأدرك أنّ هذين المجالين لم يُقاسا قبل ذلك مطلقا، وهما بالفعل لا ينطبقان على نظريّة ماكسويل في الكهرباء والمغناطيسية. ولذلك جادل آينشتاين أنّه من غير المنطقي أن يتمّ اعتبار سرعة الضوء بالنسبة إلى مراقب ما يمكن أن تقل إلى الصفر، أو أن تقل بأيّ شكل كان.

وأصبحت هذه الفكرة المُسلمة الثانية لنظريته النسبيّة.

* لا يمكن أن يكون الهواء الوسط الناقل للأمواج الضوئية؛ لأنّ الضوء ينتقل من الشمس إلى الأرض خلال الفضاء الفارغ إلى حد ما. ولذلك تمّ افتراض وسط آخر: إنّه الأثير. ولم يكن الأثيرُ شفافاً فقط، وبسبب صعوبة قياسه، فقد تمّ افتراض عدم وجود كثافة له.

المُسلّمة الأولى للنسبية الخاصة

وفي نشرته الشهيرة عام 1905، اقترح آينشتاين التخلي تمامًا عن فكرة الأثير والفرضيات المصاحبة للإطار المرجعي المطلق الساكن. وقد تضمن اقتراحه الجديد مُسلمتين: الأولى تعدّ امتدادا لمبدأ نسبيّة جاليليو – نيوتن. وهي تضمّ قوانين الفيزياء الأخرى ومن ضمنها الكهرباء والمغناطيسية وليس فقط قوانين الميكانيكا. **المُسلّمة الأولى*** ***(مبدأ النسبيّة):*** **تمتلك قوانين الفيزياء الشكل نفسه في الأطر المرجعية القصورية جميعها.**

المُسلّمة الثانية للنسبية الخاصة

في حين تتوافق المُسلمة الثانية مع الأولى:

المُسلّمة الثانية ***(ثبات سرعة الضوء):*** **ينتشر الضوء خلال الفضاء الفارغ بسرعة محددّة، c، لا تعتمد على سرعة المصدر أو المراقب.**

وهاتان المُسلّمتان تشكلان أساس نظريّة النسبيّة الخاصّة لآينشتاين. وسُمّيت خاصة لتمييزها عن عمله اللاحق "نظريّة النسبيّة العامّة"، التي تتعامل مع الأطر المرجعية (المتسارعة) اللاقصورية (الفصل 33). وتتعامل النظريّة الخاصّة، والتي نناقشها هنا، مع الأطر القصورية فقط (الفصل 33).

وتبدو المُسلمة الثانية صعبة القبول وكأنّها تُخلّ بالمنطق العام. وكبداية، يجب أن نفكّر بالضوء المنتقل خلال الفضاء الفارغ، فلا يُعدّ الاستغناء عن الأثير أمرًا صعبًا حيث إنّه لم يُقس مطلقًا. ولكن المُسلمة الثانية تخبرنا بأنّ سرعة الضوء في الفراغ هي دائما نفسها 3.00×10^8 m/s بغض النظر عن سرعة المراقب أو المصدر. وعليه، فإنّ شخصًا ما يتحرك باتجاه مصدر الضوء أو مبتعدًا عنه سيقيس سرعة الضوء نفسها تمامًا كشخص ساكن بالنسبة إلى المصدر. وهذا ما يتناقض مع تجاربنا اليومية؛ لأنّ من المتوقع أن نضيف سرعة المراقب. وعلى الوجه الآخر، ربّما لا يمكن لنا توقع أنّ التجارب اليومية مفيدة عندما نتعامل مع سرعة الضوء الكبيرة. إضافة إلى ذلك، فإنّ النتيجة الخاوية لتجربة مايكلسون ومورلي متطابقة تماما مع المسلمة الثانية.**

"تجربة ذهنية"

وهناك استحسان معين في اقتراح آينشتاين. فعند التخلي التام عن فكرة الإطار المرجعي المطلق، أصبح من الممكن التوفيق بين الميكانيكا التقليدية والنظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل. إنّ سرعة الضوء التي تنبأت بها معادلات ماكسويل هي سرعة الضوء في الفراغ في أيّ إطار مرجعي.

وتطلبت نظريّة آينشتاين منّا التخلّي عن المفاهيم البديهية للمكان والزمان. وسنختبر في البنود القادمة بعض النتائج الغريبة والمثيرة في الوقت نفسه للنسبيّة الخاصّة. ونقاشنا في معظم أجزائه سيكون بسيطا. وسنستخدم الأسلوب نفسه الذي استخدمه آينشتاين؛ سنتخيل حالات تجريبية بسيطة جدًا لا تحتاج إلى الرياضيات إلا قليلاً. وفي هذه الحالة نستطيع أن نتفحّص كثيرًا من نتائج نظريّة النسبيّة دون الخوض في حسابات تفصيلية، وهذا هو الذي أطلق عليه آينشتاين التجارب "الذهنية".

3-26 التّزامن

تعريف الحدث

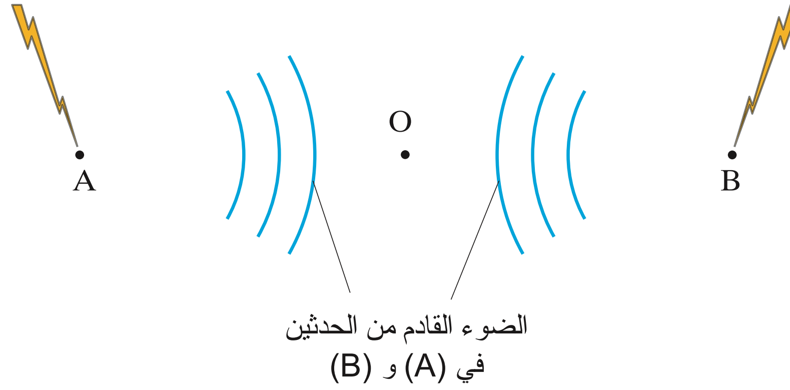
هناك نتيجة مهمّة لنظريّة النسبيّة وهي أننا لم نعد ننظر إلى الزمن على أنّه كمّية مطلقة. لا أحد يشكّ بأنّ الزمن يتقدّمُ إلى الأمام وليس إلى الخلف أبدًا. ولكن الفترة الزمنية بين حدثين- حتى ولو كانا متزامنين- تعتمد على إطار المراقب المرجعي. ونعني "بالحدث" الذي سنستخدمه بكثرة هنا، شيئا يحدث في مكان وزمن معينين.

* يمكن صياغة المُسلّمة الأولى كالتالي: ليست هناك أيّ تجربة تستطيع أن تجريها في إطار مرجعي قصوري لتتيقن ما إذا كنت ساكنا أم متحركا بانتظام وبسرعة ثابتة.

** يمكن اعتبار تجربة مايكلسون ومورلي أيضًا دليلًا على المُسلّمة الأولى بما أنه كان المقصود من إجرائها قياس حركة الأرض بالنسبة إلى إطار مرجعي مطلق. وفشلها في تحقيق ذلك يوحي بغياب أيّ إطارٍ مفضل.

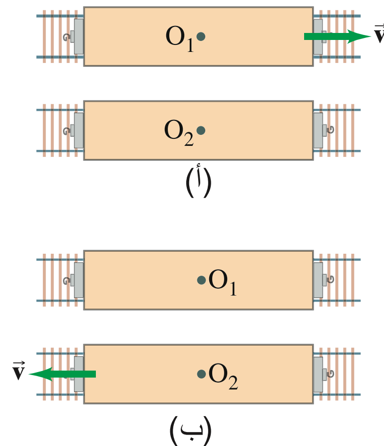
ويُقالُ عن حدثين أنّهما متزامنان إذا حصلا خلال الوقت نفسه تمامًا. ولكن كيف يمكننا أن نعرف ما إذا حصلا خلال الوقت نفسه تماما؟ وإذا حصلا عند الموضع نفسه في الفراغ – مثل وقوع تفاحتين على رأسك في الوقت نفسه– فهذا أمر بسيط. ولكن إذا حصلا في مكانين مختلفين تفصلهما مسافة كبيرة فهو أمر أكثر صعوبة لمعرفة ما إذا كان حدوثهما متزامنا لحاجتنا إلى الأخذ بالحسبان الزمن اللازم للضوء القادم منهما للوصول إلينا. وبما أنّ الضوء يتحرك بسرعة ثابتة، فيجب على الشخص الذي يرى حدثين أن يعيد الحساب لمعرفة وقت حدوثهما الفعلي. فعلى سبيل المثال، إذا تمّ ملاحظة حدثين في الوقت نفسه، وكان أحدهما قد حصل على بعدٍ أكبر من الثاني بالنسبة إلى المراقب، فهذا يعني أنّ الأبعد قد حصل أولاً، وأنّ الحدثين غير متزامنين.

ونتخيل الآن تجربة ذهنية بسيطة. لنفترض أنّ مراقبا يُسمّى O وُضِعَ في منتصف المسافة تماما بين نقطتين A و B حيث يقع هناك حدثان (الشكل 26–3). افترض أنّ الحدثين برقان ضربا النقطتين A و B كما هو مبين. وللأحداث السريعة مثل البرق، هناك نبضات قصيرة من الضوء ستتحرك من A و B لتصل إلى O. ويرى المراقب O الحدثين عندما تصلُ النبضتان إليه. وإذا وصلت النبضتان إليه في اللحظة نفسها، فهذا يعني أنّ الحدثين متزامنان؛ لأنّ النبضتين الضوئيتين تسيران بالسرعة نفسها(المُسلمة الثانية)، وبما أنّ المسافة OA تساوي OB، فإنّ الزمن اللازم للضوء ليسير من A إلى O هو نفسه من B إلى O. ويستطيع المراقب O عندئذٍ، بما لا يدع مجالا للشكّ، أن يقول بأنّ الحدثين قد حصلا متزامنين. وعلى الجانب الآخر، إذا رأى O الضوء القادم من الحدث الأول قبل ذلك القادم من الحدث الثاني، فهذا يعني أنّ الحدث الأول قد حصل أولاً.

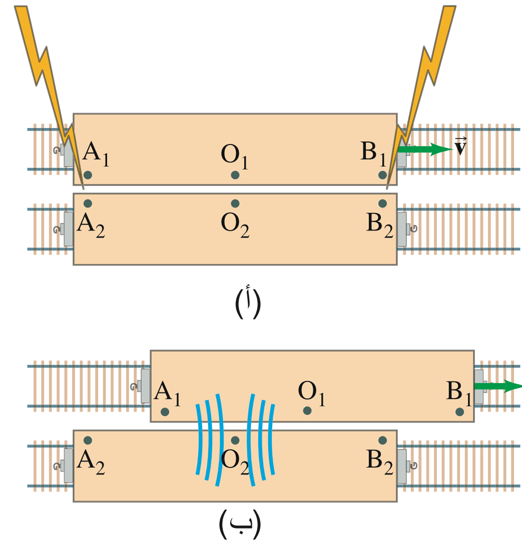


الشكل 26-3 لحظة بعد ضرب البرق النقطتين A و B، تبدأ النبضتان A و B بالتحرك باتجاه المراقب O الذي يرى البرق فقط عندما يصل الضوء إليه.

والسؤال الذي نريد الإجابة عنه هو: إذا كان الحدثان متزامنين بالنسبة إلى مراقب في إطار مرجعي واحد، فهل هما متزامنان لمراقب آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول؟ دعنا نرمز إلى المراقبَين بـ O_1 و O_2، ونفترض أنهما ثابتان في الإطارين المرجعيين 1 و 2، اللذين يتحركان بسرعة v بالنسبة إلى بعضهما بعضا. ويمكن اعتبار هذين الإطارين المرجعيين كقطارين (الشكل 26–4). فيقول O_2 بأنّ O_1 يتحرك نحو اليمين بسرعة v كما في (الشكل 26–4 أ)، في حين يقول O_1 بأنّ O_2 يتحرك نحو اليسار بسرعة v كما في (الشكل 26–4ب). وبناءً على مبدأ النسبيّة، فإنّ وجهتي النظر صحيحتان. [لاتوجد وجهة نظرٍ ثالثة تخبرنا أيّ المراقبين هو الذي يتحرك بالفعل "حقيقة"].



الشكل 26-4 يتحرك مراقبان O_1 و O_2 على قطارين مختلفين (إطاران مرجعيان مختلفان) بسرعة نسبية v. ويدّعي O_2 أنّ O_1 يتحرك إلى اليمين (أ) في حين يدّعي O_1 أنّ O_2 يتحرك إلى اليسار (ب). وجهتا النظر صحيحتان ؛ يعتمد هذا كلّه على إطارك المرجعي.



الشكل 26-5 تجربة ذهنية عن التزامن. يتحرك إطار O_2 المرجعي بالنسبة إلى O_1 نحو اليمين. تضرب صاعقة "برق" في (أ) الإطارين المرجعين عند الموضعين A_1 و A_2، في حين تضرب صاعقة "برق" أخرى عند الموضعين B_1 و B_2. (ب) بعد لحظة، يصل الضوء من الحادثتين إلى O_2 في الوقت نفسه. وعليه، فإنّ الصاعقتين متزامنتان بالنسبة إلى المراقب O_2. ولكن في إطار O_1 المرجعي، فإنّ الضوء من B_1 قد وصل بالفعل إلى O_1، في حين لم يصل الضوء من A_1 إليه بعد. لذا، فإنّ الحدث عند B_1 في إطار O_1 المرجعي لابُدّ وأنّه وقع قبل الحدث عند A_1. التزامن في الوقت ليس مطلقا.

والآن. افترض أنّ المراقبين O_1 و O_2 لاحظا صاعقتي البرق وقاساهما. وأضافت كلٌّ من الضربتين الصاعقيتين علامةً على القطارين في مكان ضربهما: عند A_1 و B_1 على قطار O_1. وعند A_2 و B_2 على قطار O_2 (الشكل 26–5 أ). وللتبسيط؛ نفترض أنّ O_1 يقف عند منتصف المسافة بين A_1 و B_1 تمامًا. وكذلك يقف O_2 عند منتصف المسافة تماما بين A_2 و B_2.

ودعنا نضع أنفسنا بداية في إطار O_2 المرجعي لنلاحظ تحرك O_1 نحو اليمين بسرعة v. ونفترض أيضا أنّ الحدثين متزامنان ويحدثان في إطار O_2 لحظيّا عندما يصبح كلّ من O_1 و O_2 مقابل بعضهما بعضا (الشكل 26–5أ). ولاحقا وبعد فترة زمنية قصيرة (الشكل 26–5 ب) يصل الضوء من A_2 و B_2 إلى O_2 في الوقت نفسه (افترضنا هذا). وبما أنّ O_2 قد يعلم أنّ المسافتين O_2A_2 و O_2B_2 متساويتان. فإنه يعلم أيضا أنّ الحادثين متزامنان في إطاره المرجعي (إطار O_2).
ولكن ماذا يلاحظ المراقب O_1 ويقيس؟ ونستطيع أن نتنبأ من إطارنا (O_2) المرجعي ماذا سيرى O_1 . حيث نرى أنّ O_2 يتحرك تجاه اليمين خلال الفترة الزمنية التي يتحرك بها الضوء من A_1 و B_1 إلى O_1. وكما هو مبين في (الشكل 26–5ب). نستطيع أن نرى من إطار O_2 المرجعي أنّ الضوء B_1 قد مرّ عن O_1 فعليّا . في حين لم يصل الضوء القادم من A_1 بعد إلى O_1. أي أنّ O_1 يلاحظ الضوء القادم من B_1 قبل أن يلاحظ الضوء القادم من A_1. وأخذا بالحسبان (1) أنّ الضوء ينتقل بالسرعة c نفسها في أيّ اتجاه وفي أيّ إطار مرجعي. (2) أنّ المسافة O_1A_1 تساوي O_1B_1. ليستطيع عندها المراقب O_1 الاستنتاج بأنّ الحدث عند B_1 قد حصل قبل الحدث عند A_1. والحادثان ليسا متزامنين للمراقب O_1 بالرغم من أنهما كذلك للمراقب O_2. وهكذا نجدُ حدثين يجريان في موضعين مختلفين فيكونان متزامنين لمراقب ما وغير متزامنين لمراقب آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول.

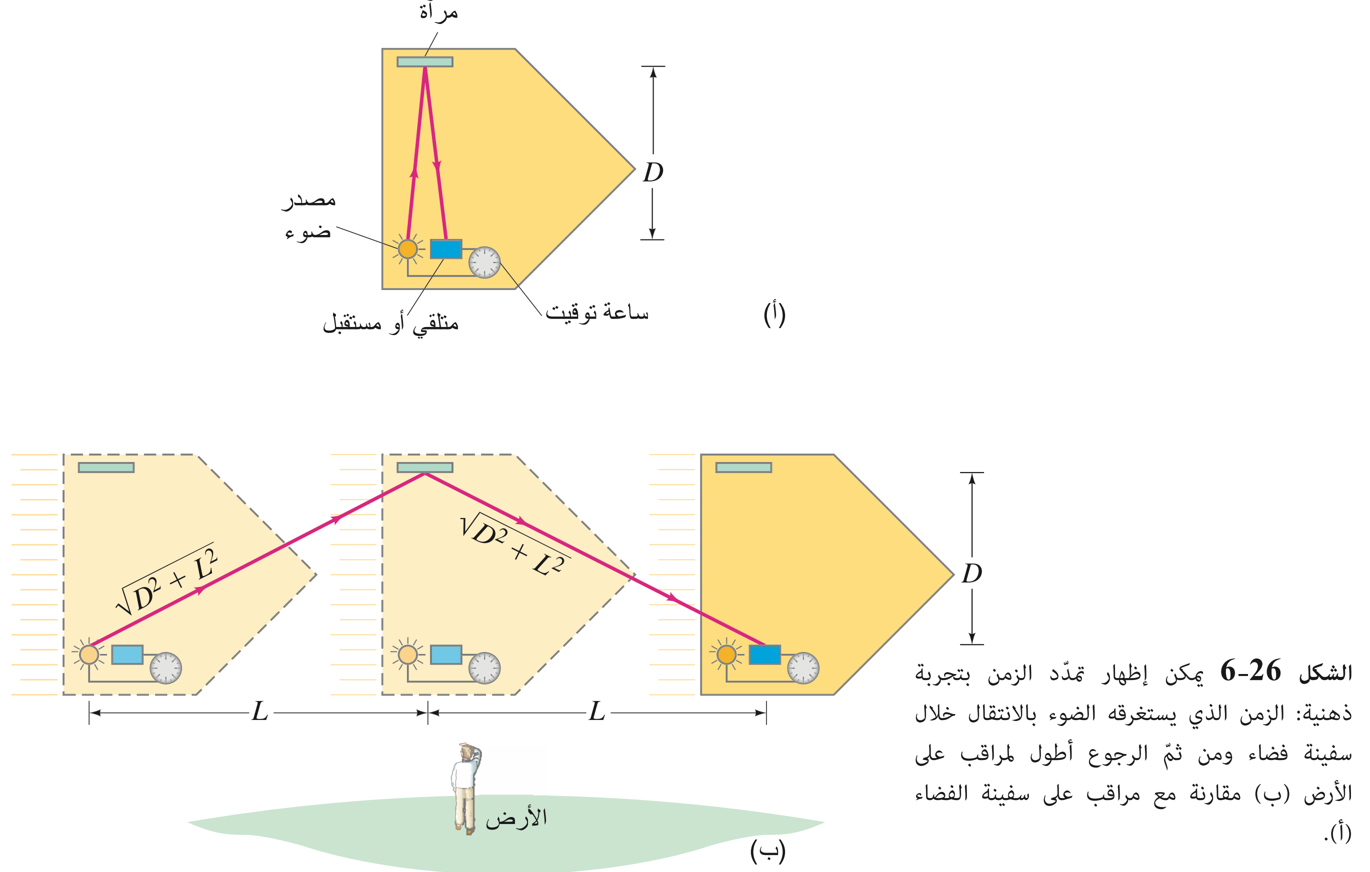
التزامن النسبي

وقد يكون مدهشا التساؤل: "من المراقب المصيب. O_1 أم O_2"؟ والجواب هو أنّ كلاهما مصيب؛ استنادا إلى النسبيّة. ليس هناك "أفضل" إطار مرجعي نستطيع اختياره لتحديد أيّ مراقب مصيب. فالإطار ان خيار مناسب. ونستطيع الاستنتاج بأنّ التزامن مبدأ غير مطلق بل نسبيّ. ولا ندرك هذا في حياتنا اليومية لأنّ تأثيره لا يمكن ملاحظته إلا إذا كانت السرعة النسبيّة للإطارين المرجعيين كبيرة جدّا (قريبة من c) أو أنّ المسافات كبيرة جدّا.

تمرين أ، اختبر التجربة في (الشكل 26–5) من إطار O_1 المرجعي. في هذه الحالة. سيكون O_1 ساكنا. وسيرى B_1 الحدث يحصل قبل A_1. هل سيدرك O_1 أنّ O_2 الذي يتحرك إلى اليسار بسرعة v سيرى الحدثين متزامنين (مساعدة: ارسم مخطّطا مكافئا للشكل 26–5).

4-26 تمدّد الزمن والتوأم المتناقض

تقترح الحقيقة، أنّ حدثين متزامنين لمراقبٍ ما قد لا يكونان متزامنين لمراقبٍ آخر،أي أنّ الزمن غير مطلق . هل من الممكن أن يمُرّ الوقت بطريقة مختلفة في إطار مرجعي مقارنة بمروره في إطار آخر؟ وهذا بالتحديد ما تنبأت به نظرية آينشتاين "النسبيّة" كما تظهر التجربة الذهنية التالية.



الشكل 26-6 يمكن إظهار تمدّد الزمن بتجربة ذهنية: الزمن الذي يستغرقه الضوء بالانتقال خلال سفينة فضاء ومن ثمّ الرجوع أطول لمراقب على الأرض (ب) مقارنة مع مراقب على سفينة الفضاء (أ).

يظهر (الشكل 26–6) سفينة فضاء تسافر مرورًا بالأرض بسرعة عالية. وتبيّنُ وجهة نظر مراقب داخل سفينة الفضاء في البند (أ). ووجهة نظر مراقب على الأرض في البند (ب). ويمتلك المراقبان ساعات توقيت دقيقة. يومِضُ الشخص في سفينة الفضاء ضوءًا، ويقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء في الانتقال على امتداد طول السفينة والعودة بعد انعكاسه من مرآة. وفي الإطار المرجعي لسفينة الفضاء، ينتقل الضوء مسافة $2D$ بسرعة c. ونقيس الزمن اللازم لانتقال الضوء وعودته، والذي سندعوه Δt_0:

فترة زمنية مقيسة بواسطة مراقب داخل سفينة فضاء.

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c}$$

ويلاحظ المراقب على الأرض (الشكل 26–6ب) العملية نفسها. ولكن بالنسبة إلى هذا المراقب، فإنّ سفينة الفضاء تتحرك. وعليه، فإنّ الضوء ينتقل خلال المسار القطري المبين المار خلال سفينة الفضاء لينعكس عن المرآة وليعود إلى المرسل. وبالرغم من أنّ الضوء ينتقل بالسرعة نفسها بالنسبة إلى هذا المراقب (المُسلّمة الثانية) إلّا أنّه يسافر مسافة أطول. لذا، فإنّ الزمن الضروري كما تمّ قياسه بواسطة مراقب على الأرض سيكون أكبر من الذي قيس بواسطة المراقب الموجود في سفينة الفضاء.

والفترة الزمنية Δt الملاحظة من قبل المراقب على الأرض يمكن قياسها كما يلي: خلال الفترة الزمنية Δt، تسافر سفينة الفضاء مسافة $2L = v\,\Delta t$ حيث تمثل v سرعة سفينة الفضاء (الشكل 26–6ب). ولهذا، فإنّ الضوء يسافر مسافة كلّيّة خلال المسار القطري (نظرية فيثاغورس) تعادل $2\sqrt{D^2 + L^2}$.

حيث $L = v\,\Delta t/2$ وعليه :

$$c = \frac{2\sqrt{D^2 + L^2}}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{D^2 + v^2(\Delta t)^2/4}}{\Delta t}$$

ونربع الطرفين

$$c^2 = \frac{4D^2}{(\Delta t)^2} + v^2$$

ونحلّ لإيجاد Δt:

$$(\Delta t)^2 = \frac{4D^2}{c^2 - v^2}$$

$$\Delta t = \frac{2D}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونضمّ هذه المعادلة مع الصيغة على صفحة 734، $\Delta t_0 = 2D/c$:

صيغة تمدّد الزمن

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \qquad \text{(26–1 أ)}$$

وبما أنّ قيمة $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ دائما أقلّ من 1، فإننا نرى أن $\Delta t > \Delta t_0$. أي أنّ الفترة الزمنية بين الحدثين (إرسال الضوء واستقباله داخل سفينة الفضاء) تعدّ أكبر لمراقب على الأرض منها لمراقب داخل سفينة الفضاء. وهذه النتيجة العامّة لنظرية النسبيّة تعرف بـــ تمدّد الزمن. ويُعبّر عنها ببساطة كما يلي:

تمدد الزمن : الساعات المتنقلة تسير ببطء

وُجِدت السّاعات المتحرّكة بالنّسبة إلى مراقب،والتي قام بقياسها بنفسه، أنها تتقدّم ببطء (مقارنة مع السّاعات غير المتحرّكة).

وبالرغم من هذا، فيجب ألا نعتقد بأنّ الساعات بطريقة ما غير صالحة. وتمّ قياس الزمن فعليًا، فوجد أنّه يتقدم ببطء أكبر في أي إطار مرجعي متحرك مقارنة مع إطار المراقب. وهذه النتيجة المذهلة نتيجة حتمية لمُسلّمتي النسبيّة.

ويظهر المعامل $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ كثيرا في النسبيّة إلى الدرجة التي أصبحنا نعطيه الرمز المختصر γ . ولنكتب المعادلة 26 – 1أ كالتالي:

تمدّد الزمن

$$\Delta t = \gamma\,\Delta t_0 \qquad \text{(26–1ب)}$$

حيث

تعريف γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{(26–2)}$$

لاحظ أنّ γ لن تكون أقلّ من 1 أبدا. وعند السرعات الطبيعية $\gamma = 1$ لعدة خانات عشرية قليلة. وبشكل عام $\gamma \geq 1$.

لماذا لا نلاحظ تمدّد الزمن

وربّما يصعب تقبل مبدأ تمدّد الزمن لأنّه يتعارض مع تجربتنا. نستطيع أن نرى من (المعادلة 26–1) أنّ ظاهرة تمدّد الزمن بالفعل مهملة إلا إذا كانت قيمة v قريبة من c بصورة معقولة. أمّا إذا كانت v أقلّ بكثير من c، فعندها سيصبح الحدّ v^2/c^2 أقلّ بكثير من 1 في مقام (المعادلة 26–1أ)، وعندئذ ستصبح $\Delta t \approx \Delta t_0$ (انظر المثال 26–2). السرعات التي نتعايش معها في الحياة اليومية أقلّ بكثير من c. لذا، فمن غير المستغرب ألا نلاحظ تمدّد الزمن.

تأكيد التجارب

اختبرت التجارب ظاهرة تمدّد الزمن وأكدت تنبؤات آينشتاين. فعلى سبيل المثال، في عام 1971، نُقِلت ساعات ذرية دقيقة جدّا في طائرات نفاثة حول العالم. وكانت سرعة الطائرات (10^3 km/h)، أي أقل بكثير من c. وكانت دقة الساعات تصل إلى نانو ثانية (10^{-9} s) لكي تستطيع أن تكتشف وتسجل أيّ تمدّد زمني. وكانت الساعات بهذه الدقة، لتؤكد (المعادلة 26–1) لأقرب خطأ عملي. ومع هذا، فقد تمّ تأكيد تمدّد الزمن قبل عدة قرون بملاحظة "الجسيمات الأولية" ذات الكتل الصغيرة (طبيعيّا 10^{-30} إلى 10^{-27} kg) والتي تتطلب كنتيجة لذلك مقدارا ضئيلا من الطاقة لتسريعها لسرعات قريبة من سرعة الضوء c. والكثير من هذه الجسيمات الأولية غير مستقرّ ويضمحلّ بعد مدة إلى جسيمات أخفّ . ومثال على ذلك، الميون (*muon*)، الذي متوسط عمره 2.2 μs وهو في حالة السّكون. وأظهرت تجارب دقيقة أنه عند قياس عمر ميون يسير بسرعات عالية وُجِد أنّه أطول من عمره وهو ساكن كما تنبأت بذلك صيغة تمدّد الزمن.

المثال 1-26 عمر ميون متحرك

(أ) ما متوسط عمر ميون كما تمّ قياسه في المختبر إذا كان ينتقل بسرعة $v = 0.60c = 1.80 \times 10^8\,\text{m/s}$ بالنسبة إلى مراقب داخل المختبر؟ متوسط عمره في حالة السكون $2.20 \times 10^{-6}\,\text{s} = 2.20\,\mu\text{s}$؟ (ب) ما أقصى مسافة يقطعها الميون بالمتوسط في المختبر قبل أن يضمحل؟

النهج : إذا كان على المراقب أن يتحرك مع الميون (سيكون عندها الميون ساكنًا بالنسبة إلى المراقب). فإنّ متوسط عمر الميون عندئذٍ سيكون $2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}$. ولمراقب داخل المختبر. فإنّ الميون سيعيش فترة أطول بسبب تمدّد الزمن. ونستخدم (المعادلة 26 – 1أ) لإيجاد متوسط العمر. أمّا متوسط المسافة فنجده من $d = v\,\Delta t$.

الحلّ : (أ) نعوّض $v = 0.60c$ في (المعادلة 26 – 1أ) فنحصل على:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2.20 \times 10^{-6}\,\text{s}}{\sqrt{1-\frac{0.36c^2}{c^2}}} = \frac{2.20 \times 10^{-6}\,\text{s}}{\sqrt{0.64}} = 2.8 \times 10^{-6}\,\text{s}$$

(ب) وتتنبأ النسبيّة أنّ الميون سينتقل متوسط مسافة

$$d = v\,\Delta t = (0.60)(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})(2.8 \times 10^{-6}\,\text{s}) = 500\,\text{m}$$

وهي المسافة التي تمّ قياسها في المختبر.

ملحوظة : عند سرعة $1.8 \times 10^8\,\text{m/s}$. ستخبرنا الفيزياء التقليدية بأنّ متوسط المسافة التي سيقطعها ميون ذومتوسط عمر $2.2\,\mu\text{s}$ هي $d = vt = (1.8 \times 10^8\,\text{m/s})(2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}) = 400\,\text{m}$. وهي أقصر من المسافة المقيسة.

تمرين ب: ما متوسط عمر الميون في (المثال 26–1) إذا كانت v (أ) $0.10c$؟ (ب) $0.90c$؟

الزمن الصحيح Δt_0 هو في إطار مرجعي حيث يحصل الحدثان عند النقطة نفسها في الفضاء.

ونحتاج إلى توضيح كيفية استخدام (المعادلة 26–1) ومعنى Δt و Δt_0. إنّ المعادلة صحيحة فقط عندما تمثل Δt_0 الفترة الزمنية بين الحدثين في إطار مرجعي عندما يحصل الحدثان عند نقطة واحدة في الفضاء كما في (الشكل 26–6أ). حيث إنّ الحدثين هما الوميضان الضوئيان: المرسل والمستقبل. وتدعى الفترة الزمنية هذه ، Δt_0، الزّمن الصحيح. وعليه، فإنّ Δt في (المعادلة 26–1) تمثل الفترة الزمنية بين الحدثين كما تمّ قياسها في إطار مرجعي متحرك بسرعة v بالنسبة إلى الأول. وفي (المثال 26–1) بالأعلى، فإنّ Δt_0 (وليست Δt) وضعت مساوية لـ $2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}$ لأنه فقط خلال إطار الميون الساكن يحدث الحدثان ("الولادة" و"الاضمحلال") عند النقطة نفسها في الفضاء. ويكون الزمن الصحيح Δt_0 هو أقصر زمن يمكن لأيّ مراقب أن يقيسه بين حدثين. ويعدّ الزمن Δt الأكبر في أيّ إطار مرجعي متحرك.

المثال 2-26 تمدّد الزمن عند 100 km/h

دعنا نفحص تمدّد الزمن للسرعات الاعتيادية اليومية. سيارة تسير بسرعة $100\,\text{km/h}$. تقطع مسافة معينة خلال $10.00\,\text{s}$ حسب ساعة يد السائق. ماذا يقيس مراقب ساكن على الأرض هذه الفترة الزمنية؟

النهج: سرعة السيارة بالنسبة إلى الأرض $100\,\text{km/h} = (1.00 \times 10^5\,\text{m})/(3600\,\text{s}) = 27.8\,\text{m/s}$. والسائق ساكن خلال الإطار المرجعي للسيارة. فنضع $\Delta t_0 = 10.00\,\text{s}$ في صيغة تمدّد الزمن.

الحلّ: نستخدم (المعادلة 26 – 1أ):

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{10.00\,\text{s}}{\sqrt{1-\left(\frac{27.8\,\text{m/s}}{3.00 \times 10^8\,\text{m/s}}\right)^2}} = \frac{10.00\,\text{s}}{\sqrt{1-(8.59 \times 10^{-15})}}$$

وإذا أدخلت هذه الأرقام في آلتك الحاسبة. فإنك ستحصل على $\Delta t = 10.00\,\text{s}$. لأنّ المقام يختلف عن 1 بمقدار ضئيل جدًا. وبالفعل. فإنّ الزمن المقيس بواسطة مراقب على الأرض لن يُظهر أيّ اختلاف عن الزمن المقيس بواسطة السائق. حتى وإن استخدمت أفضل الآلات. وسيظهر الحاسوب القادر على القياس وحتى عدد كبير من الخانات العشرية أنّ Δt أكبر من Δt_0 بحوالي $4 \times 10^{-14}\,\text{s}$.

ملحوظة: نستطيع تقدير الفرق باستخدام المتمدّدة ذات الحدّين (فهرس أ).

$$(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx \qquad [x \ll 1 \text{ حيث }]$$

تطبيق الفيزياء

استخدم مفكوك ذات الحدّين

وفي صيغتنا لتمدّد الزمن، نعوض المعامل $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

أي

$$\Delta t = \gamma\, \Delta t_0$$

$$= \Delta t_0\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\approx \Delta t_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\approx 10.00\,\text{s}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{27.8\,\text{m/s}}{3.00 \times 10^8\,\text{m/s}}\right)^2\right]$$

$$\approx 10.00\,\text{s} + 4 \times 10^{-14}\,\text{s}$$

وعليه، فإنّ الفرق بين Δt و Δt_0 الذي تمّ التنبؤ به 4×10^{-14} s وهو كمية صغيرة جدًا.

تمرين د: تحتفظ ساعة ذرية معينة بالوقت بدقة على الأرض. وإذا أخِذت هذه الساعة في سفينة فضاء تنتقل بسرعة $v = 0.60c$، فهل ستعمل هذه الساعة عندها أبطأ بالنسبة إلى الناس (أ) على سفينة الفضاء؟ أم (ب) على الأرض؟

السّفر في الفضاء

أثار تمدّد الزمن توقعات مثيرة حول السفر في الفضاء. وبحسب الفيزياء التقليدية (فيزياء نيوتن)، فإنّ الوصول إلى نجم يبعد 100 سنة ضوئية عن الأرض غير ممكن للمخلوقات البشرية العادية (السنة الضوئية هي المسافة التي يمكن أن يقطعها الضوء في سنة واحدة $= (3.0 \times 10^8\,\text{m/s} \times 3.16 \times 10^7\,\text{s} = 9.5 \times 10^{15}\,\text{m}$). وحتى لو استطاعت سفينة الفضاء أن تسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فإنها ستحتاج إلى أكثر من 100 عام لتصل إلى ذلك النجم. ولسفينة فضاء تنتقل بسرعة $v = 0.999c$، فإنّ زمن رحلة كتلك يبلغ تقريبا

$$\Delta t_0 = \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$= (100\,\text{yr})\sqrt{1 - (0.999)^2}$$

$$= 4.5\,\text{yr}$$

وبذلك، فإنّ تمدّد الزمن يسمح برحلة كهذه. ولكن قد لا نكون قادرين على تجاوز المشاكل العملية الهائلة للوصول إلى هذه السرعات والتغلب عليها. وبكل تأكيد لن يكون هذا في المستقبل القريب.

وفي هذا المثال، فإنّ 100 عام ستنقضي على الأرض، وستنقضي فقط أربعة أعوام ونصف بالنسبة إلى رائد الفضاء خلال الرحلة. هل هي الساعات فقط التي ستتباطأ لرائد الفضاء هذا؟ الجواب كلا؛ فالعمليات جميعها، بما فيها الهرم وعمليات الحياة الأخرى، ستتحرك ببطء أكثر بالنسبة إلى رائد الفضاء حسب المراقب الأرضي. ولكن بالنسبة إلى رائد الفضاء، فإنّ الزمن سيتقدم بصورة طبيعية. وسيختبر رائد الفضاء أربع سنوات ونصف من النوم الطبيعي والأكل والقراءة، وهكذا دواليك. في حين سيختبر الناس على الأرض 100 عام من النشاط الطبيعي.

مفارقة التوأم

مفارقة التوأم

بعد فترة ليست بطويلة من اقتراح آينشتاين لنظرية النسبيّة الخاصة، تمّت الإشارة إلى مفارقة واضحة . وبحسب مفارقة التوأم هذه، افترض أنّ أحد توأمين عمرهما 20 عاما قد سافر في سفينة فضاء غادرت بسرعة عالية جدّا إلى نجم بعيد ثمّ عاد أدراجه بعد ذلك. في حين بقي التوأم الآخر على الأرض . وبحسب التوأم الموجود على الأرض، فإنّ توأمه رائد الفضاء سيهرم بمقدار أقلّ منه. وخلال مرور 20 عاما على توأم الأرض، فإنه قد ينقضي عام واحد فقط (اعتمادا على سرعة سفينة الفضاء) بالنسبة إلى التوأم الرّحّال. وعليه، فعندما يعود التوأم الرّحّال فإنه من المتوقع أن يكون الأخ التوأم الموجود على الأرض قد أصبح عمره 40 عامًا تقريبًا، مقابل 21 عامًا فقط للتوأم الرّحال.

وهذه وجهة نظر التوأم على الأرض. ولكن ماذا بشأن التوأم الرّحّال؟ إذا كانت الأطر المرجعية جميعها متساوية الاحتمالية، فهل من الممكن أن يدّعي التوأم الرّحّال ما ادّعاه التوأم الأرضي كلّه، ولكن هذه المرّة بالعكس؟ هل يمكن لرائد الفضاء أن يدّعي بناءً على تحرك الأرض مبتعدة بسرعة عالية أنّ الزمن يمر ببطء أكبر على الأرض. وعليه، فإنّ توأمه الأرضي سيهرم بنسبة أقل؟ وهذا عكس ما تنبّأ به التوأم الآخر. ولا يمكن أن يكون الاثنان على صواب بعد أن تعود سفينة الفضاء إلى الأرض لتقارن مباشرة الأعمار والساعات.

ومع هذا، فلا يوجد أي تناقض هنا. فنتائج نظرية النسبيّة الخاصة —في هذه الحالة، تمدّد الزمن— يمكن تطبيقها فقط بواسطة مراقبين في إطار مرجعي قصوري. وتعدّ الأرض إطارا قصوريا (تقريبا)، أمّا سفينة الفضاء فليست كذلك. وتتسارع سفينة الفضاء في بداية الرحلة ونهايتها، وعندما تعكس اتجاهها عند أبعد نقطة في رحلتها. لا يُعدّ التوأم في سفينة الفضاء خلال التسارع في إطار قصوري . وبين ذلك، من الممكن أن يكون التوأم رائد الفضاء في إطار قصوري (القول بأنّ ساعات التوأم الأرضي تتحرك ببطء مُبَرّرٌ)، وهو ليس الإطارنفسه طوال الوقت. ويبقى التوأم الأرضي في إطار القصور نفسه. ولذلك نستطيع الوثوق في التوقعات بناءً على النسبيّة الخاصة. أي، ليس هناك أي تناقض. إن تنبؤ التوأم الأرضي بأنّ التوأم الرّحّال سيهرم بدرجة أقل هو الخيار الأصح.

مثال إضافي – باستخدام γ

* **المثال 26-3** γ لسرعات متعددة

حدّد قيمة γ لسرعة v مساوية لـ (أ) 0. (ب) $0.010c$. (جـ) $0.10c$. (د) $0.50c$ (هـ) $0.90c$ (و) $0.990c$.

النّهج : نعوّض ببساطة في (المعادلة 26–2).

الحلّ : (أ) عند $v = 0$ فإنّ $\gamma = 1/1 = 1$ تماما.

(ب) عند $v = 0.010c = 3.0 \times 10^6\,\mathrm{m/s}$ (سرعة عالية جدا):

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.010c}{c}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - (0.010)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.99990}} = 1.00005$$

إلا إذا أُعطيت v لأكثر من عدة أرقام مميزة، فإنّ $\gamma = 1.0$ هنا. ونرى أنّ "γ" لا يمكن أن تكون أقلّ من 1.0، وستزيد على 1.0 بوضوح فقط عند السرعات المرتفعة.

(جـ) لسرعة أعلى 10 أضعاف ، $v = 0.10c$، نحصل على

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.10)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.99}} = 1.005$$

(و) عند سرعة تعادل نصف سرعة الضوء

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(0.50)^2}} = 1.15$$

(هـ) عند $v = 0.90c$، نحصل على $\gamma = 2.3$.

(و) عند $v = 0.990c$، نحصل على $\gamma = 7.1$

يلخّص (الجدول 26–1) هذه النتائج.

الجدول 26–1 قيم γ

γ	v
1.000	0
1.000	$0.01c$
1.005	$0.10c$
1.15	$0.50c$
2.3	$0.90c$
7.1	$0.99c$

*نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)

تطبيق الفيزياء

نظام تحديد الموقع العالمي (GPS)

الطائرات، والسيارات، والقوارب، والمتنزهون جميعهم يستخدمون لواقط نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، ليخبرهم بدقة متناهية عن أماكن وجودهم في أيّ لحظة. ويُرسِلُ 24 قمرا صناعيّا لنظام تحديد المواقع إشارات زمنية دقيقة باستخدام ساعات ذريّة. ويقاربُ لاقطك الأوقات الملتقطة من أربعة أقمار صناعية على الأقلّ تمّت مزامنتها إلى جزء واحد لكلّ 10^{13}. وعند مقارنة الفروقات الزمنية مع كلّ من مواضع الأقمار الصناعية المعروفة وسرعة الضوء الثابتة، يستطيع اللاقط تحديد بعده عن كلّ قمر صناعيّ، ويُحدّدُ موقعه على الأرض بناءً على ذلك. ويستطيع أن يفعل هذا بدقة اعتيادية تصل إلى 15 m إذا كان قد تمّ تصميمه كالذي في الأسفل للقيام بالتصحيحات الناجمة عن النسبيّة الخاصّة.

المثال المفاهيمي 26-4 تصحيح النسبيّة لـ GPS

يتحرّكُ قمرٌ صناعيّ (GPS) بمعدل $4\ \text{km/s} = 4000\ \text{m/s}$. أثبت أنّ لاقط GPS جيّدًا يحتاج إلى تصحيح تمدّد الزمن للحصول على نتائج تتوافق مع الساعات الذرية الدقيقة إلى جزء لكلّ 10^{13}.

الحَلّ: دعنا نحسب قيمة ظاهرة تمدّد الزمن بإدخال $v = 4000\ \text{m/s}$ في (المعادلة 26–1أ):

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\Delta t_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{4\times10^3\ \text{m/s}}{3\times10^8\ \text{m/s}}\right)^2}}\Delta t_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-1.8\times10^{-10}}}\Delta t_0$$

ونستخدم المتمدّدة ذات الحدين:

$(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$ لأجل $x \ll 1$ (انظر الفهرس أ) وهي هنا $(1-x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2}x$

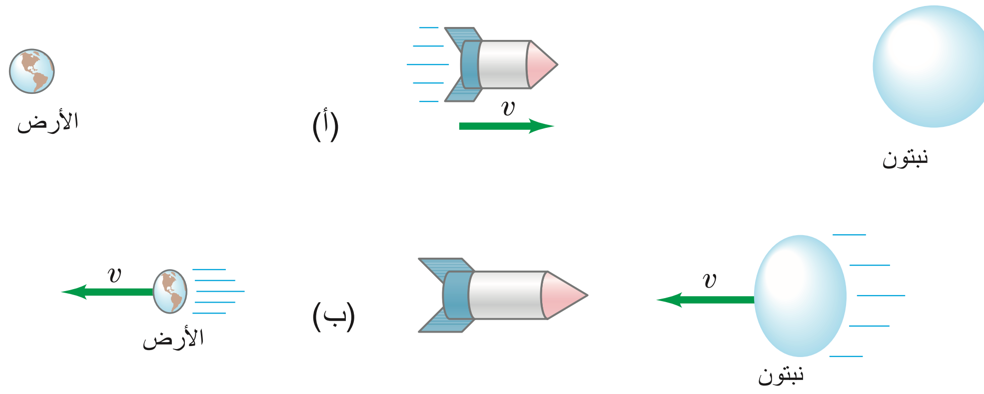
أي أنّ

$$\Delta t = \left(1 + \tfrac{1}{2}(1.8\times10^{-10})\right)\Delta t_0 = \left(1 + 9\times10^{-11}\right)\Delta t_0$$

"الخطأ" الزمني مقسوم على الفترة الزمنية

$$\frac{(\Delta t - \Delta t_0)}{\Delta t_0} = 1 + 9\times10^{-11} - 1 = 9\times10^{-11} \approx 1\times10^{-10}$$

وإن لم يؤخذ تمدّد الزمن بالحسبان، فإنّه سيضيف خطأ يقدّرُ بجزءٍ واحدٍ لكلّ 10^{10}. وهو 1000 مرّة ضعف الدقة في الساعات الذرّية. وعدم التصحيح لتمدّد الزمن يعني أنّ اللاقط قد يعطي تحديدا أقلّ دقة للموقع.



الشكل 7-26 (أ) سفينة فضاء تسافر بسرعة عالية جدّا من الأرض إلى كوكب نبتون كما يشاهد من إطار الأرض المرجعي. (ب) بالنسبة إلى مراقب على سفينة الفضاء، تتحرك الأرض ونبتون بسرعة عالية جدّا v: تغادر الأرض سفينة الفضاء وبعد زمن Δt_0 يصل نبتون إلى سفينة الفضاء.

5-26 تقلّص الطّول

لا تختلف الفترات الزمنية وحدها فقط في الأطر المرجعية المختلفة: فالفترات الفضائية –الأطوال والمسافات–تختلف هي أيضاً وفقا لنظرية النسبيّة الخاصة. وسنوضح هذا بتجربة ذهنية.

يرى مراقبون على الأرض سفينة فضاء تسافر بسرعة v من الأرض ولنقل إلى نبتون (الشكل 26–7أ). والمسافة بين الكوكبين كما قاسها مراقبون على الأرض هي L_0. والزمن اللازم لهذه الرحلة المقيس من الأرض هو:

$$\Delta t = \frac{L_0}{v} \qquad \text{[مراقب أرضي]}$$

في (الشكل 26 – 7ب) نرى وجهة نظر مراقبين على سفينة الفضاء. وفي هذا الإطار المرجعي، فإنّ سفينة الفضاء ساكنة ويتحرك كلّ من الأرض ونبتون* بسرعة v. إنّ الزمن بين مغادرة الأرض والوصول إلى نبتون (كما لوحظ من سفينة الفضاء) هو "الزمن الصحيح". نتيجة لوقوع الحدثين عند النقطة نفسها في الفضاء (أي على سفينة الفضاء). ولذلك، فإنّ الفترة الزمنية أقلّ نسبة لمراقبي سفينة الفضاء مقارنة بالمراقبين على الأرض. أيّ أنه بسبب تمدّد الزمن (المعادلة 26–1) فإنّ زمن الرحلة كما تمّت رؤيته بواسطة سفينة الفضاء هو

$$\Delta t_0 = \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2} = \Delta t/\gamma \qquad \text{[مراقب سفينةالفضاء]}$$

وبما أنّ المراقبين على سفينة الفضاء يقيسون السرعة نفسها، ولكن بزمنٍ أقلّ بين هذين الحدثين، فإنهم يقيسون مسافة أقلّ أيضًا. وإذا جعلنا L لتكون المسافة بين الكوكبين كما يراها المراقبون على سفينة الفضاء، فإنّ $L = v\,\Delta t_0$، ونستطيع إعادة كتابتها كالتالي:

$$L = v\,\Delta t_0 = v\,\Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2} = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

وأخيرا سنحصل على النتيجة المهمة الآتية:

$$L = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \textbf{(3–26 أ)}$$

صيغة تقلص الطول

أو باستخدام γ (المعادلة 26–2)

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \qquad \textbf{(3–26 ب)}$$

وهذه نتيجة عامّة لنظريّة النسبيّة الخاصّة وتطبق على أطوال الأجسام بالإضافة إلى المسافات بينها. ويمكن صياغة النتيجة ببساطة كبيرة كالتالي:

عند قياس طول جسم ما، وُجد أنه يكون أقصر عندما يتحرّك بالنّسبة إلى المراقب، مقارنة معه وهو ساكن.

تقلص الطول: الأجسام المتحركة أقصر (باتجاه الحركة)

ويُسَمّى هذا **تقلصَ الطول**. ويُدعى الطول L_0 في (المعادلة 26–3) الطولَ الصّحيح. وهو طول الجسم (أو المسافة بين نقطتين تمّ قياس موضعيهما في الوقت نفسه) كما حدّده مراقبون ساكنون بالنسبة إليه. وتعطي (المعادلة 26–3) الطول L الذي سيقيسه المراقبون عندما يمرّ الجسم بمحاذاتهم بسرعة v.

تنويه: قيس الطول الصحيح في إطار مرجعي حيث الموضعان ساكنان.

* نفترض أنّ v أكبر بكثير من السرعة النسبية لنبتون والأرض، لدرجة يمكن عندها إهمال الأخيرة.

من المهمّ أن نلاحظ أنّ تقلص الطول يحدث على امتداد اتّجاه الحركة. فعلى سبيل المثال، سفينة الفضاء المتحركة في (الشكل 26–7أ) أصبحت أقصر طولاً، ولكن ارتفاعها بقي كما هو مقارنة مع ما كان عليه وهي ساكنة.

وتقلص الطول يشبه تمدّد الزمن في أنّه غير ملاحظ في الحياة اليومية لاختلاف المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ في (المعادلة 26–3) عن 1.00 بصورة واضحة خاصة عندما تكون v كبيرة جدّا.

مثال 26-5 تقلص اللوحة الزيتية

لوحة زيتية مستطيلة الشكل، طولها 1.00 m وعرضها 1.50 m، معلقة على جدار جانبي في سفينة فضاء تمرّ بمحاذاة الأرض بسرعة $0.90c$. انظر (الشكل 26 – 8أ). (أ) ما أبعاد اللوحة كما يراها قبطان سفينة الفضاء؟ (ب) ما أبعادها كما يراها مراقب أرضي؟

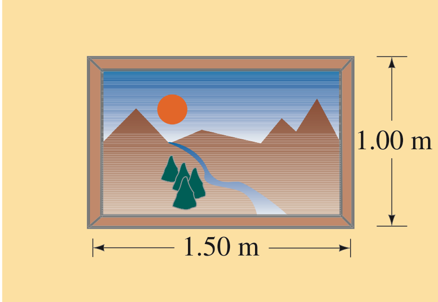
النّهج: نطبّق صيغة تقلص الطول (المعادلة 26 – 3) على البعد الموازي للحركة. وتمثل v سرعة اللوحة الزيتية بالنسبة إلى المراقب.

الحل: (أ) اللوحة ساكنة $(v = 0)$ على سفينة الفضاء. وعليه، ستبدو (بالإضافة لكلّ شيء آخر داخل سفينة الفضاء) طبيعية جدّا بالنسبة إلى ركاب السفينة الفضائية جميعهم. ويرى القبطان لوحة أبعادها 1.00-m في 1.50-m.

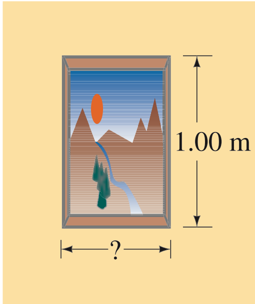
(ب) البعد في اتّجاه الحركة هو الذي يتقلص فقط. لذا، فإنّ الارتفاع لا يتغير ويبقى 1.00 m (الشكل 26 – 8 ب). ومع هذا، فإنّ الطول يتقلص إلى

$$L = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$
$$= (1.50\,\text{m})\sqrt{1 - (0.90)^2} = 0.65\,\text{m}$$

ولذلك، فإنّ أبعاد اللوحة هي $1.00\,\text{m} \times 0.65\,\text{m}$.



(أ)



(ب)

الشكل **26-8** (المثال 26-5).

المثال 26-6 قطار أحلام خارق

يمرّ قطارٌ سريعٌ جدّا، طوله الصحيح 500 m، خلال نفقٍ طوله 200-m. إنّ سرعة القطار مرتفعة جدًّا لدرجة أنه ظهر لمراقب ساكن بالنسبة إلى الأرض (يجلس ساكنا فوق التلة أعلى النفق) وكأنّه تقلّص تماما فأصبح بطول النفق. أي أنّ محرك القطار كاد يظهر من مقدمة النفق فقط عندما اختفت آخر عربة يجرها داخل الطرف الآخر للنفق. ما سرعة القطار؟

النّهج: بما أنّ القطار تقلّص تماما بحيث أصبح بطول النفق، فإنّ طوله وفق ما رآه المراقب الساكن على الأرض 200 m. ولذلك يمكن استخدام تقلص الطول (المعادلة 26–3) لإيجاد v.

الحل: إنّ تعويض $L = 200\,\text{m}$ و $L_0 = 500\,\text{m}$ في (المعادلة 26–3) يعطي

$$200\,\text{m} = 500\,\text{m}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

وبقسمة الجانبين على 500 m وتربيعهما نحصل على

$$(0.40)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

أو

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - (0.40)^2}$$
$$v = 0.92c$$

ملحوظة : لا يمكن لأيّ قطار حقيقي أن يسير بهذه السرعة. ومع هذا، فمن الطرافة التفكير في ذلك.

ملحوظة: لا يمكن لمراقب على القطار أن يرى نهايتي القطار داخل النفق في اللحظة نفسها؛ فالتزامن شيء نسبيّ.

تمرين د: كم يجب أن تكون سرعة سفينة الفضاء في (المثال 26–5)، حتى يستطيع المراقبون على الأرض من رؤيتها وقد تقلصت بمقدار 10 cm ليصبح الطول $(L = 1.40\,\text{m})$؟

*6-26 الفضاء والزّمن رُباعيّ الأبعاد

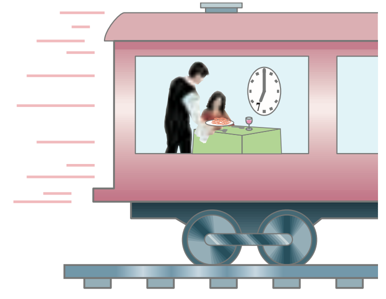
دعنا نتخيّلُ شخصا ما على قطار يتحركُ بسرعةٍ عاليةٍ جدّا، ولنقل $0.65c$ (الشكل 26–9). ويبدأ هذا الشخص بتناول وجبة طعام عند الساعة 7:00، وينتهي عند الساعة 7:15 حسب ساعة القطار. ويحصل الحدثان عند بدء تناول الوجبة والانتهاء منها، عند الموضع نفسه على القطار. لذا، فإنّ الزمن الصحيح بين هذين الحدثين يساوي 15 دقيقة. وبالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ تناول الوجبة سيستغرق فترة أطول – 20 دقيقة – وفقا (للمعادلة 26–1) ودعنا نفترض أنه تمّ تقديم الوجبة على صحن قطره 20-cm. بالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ عرض الصحن 15 cm فقط (تقلص الطول). بالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ الوجبة تبدو أصغر، ولكنها تستمر لفترة أطول.

وإلى حدّ ما، فإنّ ظاهرتي تمدّد الزمن وتقلص الطول توازن إحداهما الأخرى. وعندما يُشاهَدُ من الأرض، فإنّ ما يبدو وكأنّ الجسم يفقده في الحجم يكتسبه في طول فترة بقائه؛ تمّت مقايضة الفضاء أو الطول بالزمن.

وأفضت أفكار مثل هذه إلى فكرة الفضاء والزمن رباعي الأبعاد؛ فالفضاءُ يأخذ ثلاثة أبعادٍ، في حين يأخذ الزمنُ البعدَ الرابع. ويرتبط الفضاء والزمن ببعضهما بشكل جوهري. وتماما مثلما يحدث عندما نحاول الضغط على بالون فيصبح أحد أبعاده أطول والبعد الآخر أقصر، فإننا عندما نختبر الأجسام والأحداث من خلال أطر مرجعية مختلفة، فإنّ مقدارا ما من الفضاء سيحلّ محله الزمن والعكس صحيح.

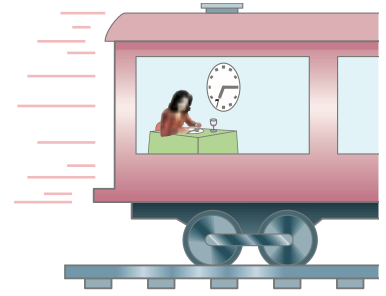
ومع أنّ فكرة أبعادٍ أربعة تبدو غريبة، إلا أنها تشير إلى فكرة أنّ أيّ جسم أو حدث قد يوصف بأربع كميات هي: ثلاث لوصف موقعه في الفضاء، وواحدة لوصف زمن حدوثه. وفي الحقيقة، فإنّ الوجه غير العاديّ في الفضاء والزمن رباعيّ الأبعاد هو إمكانية الخلط بين الفضاء والزمن: يمكن أن يحلّ جزءٌ صغيرٌ من أحدهما محلّ جزءٍ صغير من الآخر عندما يتغير الإطار المرجعي.

إنّ استيعاب فكرة الفضاء والزمن رباعيّ الأبعاد عسيرة على فهم الكثير منا، حيث نشعر- نوعا ما- كما شعر الفيزيائيون قبل التوصل إلى النسبيّة، في أنّ الفضاء والزمن شيئان منفصلان تماما. ومع هذا، فقد وجدنا في تجاربنا الذهنية أنهما غير منفصلين تماما عن بعضهما بعضا. ولنفكر بجاليليو ونيوتن. فقبل جاليليو كان الاتجاه الرأسي، وهو الذي تسقط الأجسام على امتداده يُعدّ مُختلفا تماما عن البعدين الأفقيين. وأثبت جاليليو أنّ الاتجاه الرأسي يختلف فقط في كونه اتجاه عمل الجاذبية. وفيما عدا ذلك، فإنّ الأبعاد الثلاثة متكافئة جميعها، وهي وجهة نظر نقبلها اليوم كلّنا. والمطلوب منا اليوم هو أن نقبل بُعدا آخر، ألا وهو الزّمن، الذي كنا نعتقد قديما بأنه مختلفٌ بطريقةٍ ما. وهذا لا يعني أننا نقصد عدم وجود أيّ اختلافٍ بين الفضاء والزمن. ولقد أظهرت النسبيّة أنّ تحديد كلٍّ من الفضاء والزمن غير منعزلٍ عن الآخر.





(أ)





(ب)

الشكل 9-26 حسب ساعة دقيقة على متن قطار يتحرك بسرعة : (أ) يبدأ الشخص بتناول الطعام عند 7:00 (ب) ينتهي عند فترة تناول الطعام ليجدوها 20 دقيقة.

7-26 الزّخم والكتلة النّسبيّان

لقد رأينا إلى الآن في هذا الفصل أنّ الكميتين الميكانيكيتين الأساسيتين، الطول والفترة الزمنية، بحاجة إلى تعديل بسبب ارتباطهما ببعض ، حيث تعتمد قيمتاهما على الإطار المرجعي اللتان تقاسان من خلاله. ومن الممكن التوقع بأنّ هناك كميات فيزيائية أخرى ربما تحتاج إلى تعديل حسب نظرية النسبيّة، كالزخم (كمية التحرك) والطاقة، والكتلة.

ويظهر تحليل التصادمات بين جسيمين أنه إذا أردنا إدماج قانون حفظ الزخم في النسبيّة؛ فعلينا إعادة تعريف الزخم كالتالي:

الزخم النسبي

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v \qquad \textbf{(4–26)}$$

وتعدّ γ هنا اختصارا لـ $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ كما في السابق (المعادلة 26–2). ولسرعات

أقلّ بكثير من سرعة الضوء، فإنّ (المعادلة 26–4) تعطي الزخم التقليدي $p = m_0 v$.

ولقد كتبنا m_0 بدلاً من m؛ لأنّ (المعادلة 26–4) تتطلب من الفيزيائيين أن يفسّروا الكتلة اعتمادًا على نظرية النسبيّة. وبالتحديد، فإنّ الجسم الساكن يمتلك كتلة سكونيّة m_0. ومع هذا، فيمكن لكتلته أن تزداد مع السرعة حسب الصيغة

صيغة ازدياد الكتلة

$$m_{rel} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 \qquad (5\text{–}26)$$

وتُدعى m_{rel} **الكتلة النسبيّة**. وكن حذرًا بألاّ تظنّ أنّ الكتلة ستكتسب جسيمات أكثر أو جزيئات إضافية في حين تزداد سرعتها لتصبح كبيرة جدا؛ ليس هذا ما يحدث. وفي الحقيقة، يعتقد كثيرٌ من الفيزيائيين أنّ الجسم يمتلك كتلة وحيدة (كتلته السكونية)، وأنّ الزخم فقط هو الذي يزداد بازدياد السرعة، وهي ظاهرة نسبوية يتفق عليها الجميع. [نستخدم الرموز السفلية لـ m (m_0 و m_{rel}) لنتلافى أيّ سوء فهم. وإذا رأيت m دون أيّ رمز سفليّ، فباستطاعتك التأكّد بأنها تعني الكتلة السكونية].

ولقد تمّ اختبار الزخم النسبويّ مراتٍ عديدةٍ على الجسيمات الأولية الضئيلة (مثل الميونات) ووُجِدَ أنه يزداد حسب (المعادلة 26–4).

المثال 26-7 زخم إلكترون متحرك

قارن الزخم لإلكترون عندما تكون سرعته: (أ) $4.00 \times 10^7\,\mathrm{m/s}$ داخل CRT في جهاز تلفاز. (ب) $0.98c$ داخل مسارع يُستخدم في علاج السرطان.

النّهج: نستخدم (المعادلة 26–4) لإيجاد زخم إلكترونٍ متحركٍ.

الحلّ: (أ) عندما $v = 4.00 \times 10^7\,\mathrm{m/s}$، يكون زخم الإلكترون

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{(4.00 \times 10^7\,\mathrm{m/s})^2}{(3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s})^2}}} = 1.01 m_0 v$$

والمعامل $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1.01$، وبذلك فإنّ الزخم يزيد حوالي 1% فقط عن القيمة التقليدية.

(وإذا عوضنا بالكتلة السكونية للإلكترون $m_0 = 9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$، فإنّ الزخم سيكون $p = 1.01 m_0 v = 3.68 \times 10^{-23}\,\mathrm{kg \cdot m/s}$). (ب) مع $v = 0.98c$ فسيكون الزخم

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{(0.98c)^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} = 5.0 m_0 v$$

إلكترون يتحرك بمعدل 98% من سرعة الضوء يمتلك $\gamma = 5.0$، ويكون زخمه خمسة أضعاف قيمته التقليدية.

26-8 السّرعة القصوى

هناك نتيجة أساسية لنظرية النسبيّة الخاصّة، وهي أنّ سرعة الجسم لا يمكن لها أن تساوي سرعة الضوء أو تزيد عليها. أي أنّ سرعة الضوء هي الحدّ الطبيعي الأعلى للسرعة في الكون. كما يظهر من (المعادلات 26–1، أو 26–3، أو 26–4).

وربّما من الأسهل أن نرى ذلك من (المعادلة 26–4): كلما تسارع جسم ما لسرعات أعلى وأعلى، فإنّ زخمه يصبح أكبر وأكبر. وبالفعل، إذا كانت v تساوي c، فإنّ المقام في هذه المعادلة سيصبح صفرًا (وكذلك في المعادلتين الأخيرتين) وسيؤول الزخم إلى مالانهاية. وعليه، فإنّ تسريع جسم إلى $v = c$ سيتطلب مقدارا لانهائيًا من الطاقة، وهذا غير ممكن.

9-26 الكتلة والطّاقة $E = mc^2$

إذا احتاج الزخم إلى التعديل كي يتناسب مع النسبيّة كما رأينا في (المعادلة 26–4). فقد نتوقع أنّ الطاقة تحتاج إلى إعادة النظر بها. وبالفعل، لم يطوّر آينشتاين صيغة جديدة للطاقة الحركية فقط، ولكنه وجد أيضا علاقة جديدة بين الكتلة، والطاقة، والفكرة المُغيِّبَة القائلة بأنّ الكتلةَ شكلٌ من أشكال الطاقة.* ونستطيع أن نبدأ من مبدأ الشغل والطاقة (الفصل السادس). ونفترض أنه لا يزال صحيحا في النسبيّة، أي أنّ الشغل الصافي المبذول على جسم ما يساوي التغير في طاقته الحركية (KE). وباستخدام هذا المبدأ، أثبت آينشتاين أنه عند السرعات المرتفعة، تكون الصيغة $\mathrm{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ غير صحيحة. وبدلاً من ذلك، أثبت أنّ الطاقة الحركية لجسم ما، كتلته السكونية m_0، ويسافر بسرعة v، تعطى كالتالي:

$$\mathrm{KE} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2 \qquad (26\text{–}6أ)$$

طاقة الحركة النسبيّة

وبدلالة $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ نستطيع أن نعيد كتابة (المعادلة 16–6أ) كالتالي:

$$\mathrm{KE} = \gamma m_0c^2 - m_0c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 \qquad (26\text{–}6ب)$$

وتحتاج (المعادلتان 26–6) إلى بعض التفسير. يزداد الحدّ الأوّل بازدياد سرعة الجسم v. أما الحدّ الثاني، m_0c^2، فهو ثابت، ويُدعى الطاقة السكونية E_0 للجسم، ويمثل شكلاً من أشكال الطاقة التي يمتلكها الجسم حتى وهو ساكن. لاحظ أنه إذا كان الجسم ساكنًا $(v = 0)$، فإنّ الحدّ الأوّل في (المعادلة 26–6أ) سيصبح m_0c^2، وستكون $\mathrm{KE} = 0$ كما يجب أن تكون.

ونستطيع إعادة ترتيب (المعادلة 26–6ب) للحصول على

$$\gamma m_0c^2 = m_0c^2 + \mathrm{KE}$$

وندعو γm_0c^2 الطاقة الكلية E للجسم (مفترضا عدم وجود طاقة وضع)، لأنّها تساوي الطاقة السكونية إضافة إلى الطاقة الحركية:

$$E = m_0c^2 + \mathrm{KE} \qquad (26\text{–}7أ)$$

الطاقة الكلية (مُعرّفة)

ويمكن كتابة الطاقة الكلية باستخدام (المعادلة 26–6) كما يلي:

$$E = \gamma m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (26\text{–}7ب)$$

ولجسم ساكن (في إطار مرجعي ما) تكون KE صفرا في (المعادلة 26–7). وبذلك، فإنّ الطاقة الكلية هي طاقته السكونية E_0:

$$E_0 = m_0c^2 \qquad (26\text{–}8)$$

علاقة الكتلة بالطاقة

وعندنا هنا صيغة آينشتاين الشهيرة التي تكتب عادة ببساطة $E = mc^2$. وتربط هذه الصيغة رياضيًّا بين مبدأ كلّ من الطاقة والكتلة. ولكن إذا كانت ستعني هذه الفكرة أيّ شيء من وجهة النظر العملية، فإنّ على الكتلة أن تكون قادرة على التحوّل إلى أشكال أخرى من الطاقة، والعكس صحيح. لقد اقترح آينشتاين إمكانية حدوث هذا. وبالفعل، فإنّ تحوّل الكتلة إلى أشكال أخرى من الطاقة، وعكس ذلك،قد تمّ تأكيده عمليا مراتٍ لا تحصى. كما أنّ التحوّل بين الكتلة والطاقة غالبا ما يتمّ قياسه في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات الأولية. وعلى سبيل المثال، فإنّ البيون المتعادل (π^0) وكتلته السكونية 2.4×10^{-28} kg قد تمّ ملاحظته ليضمحل إلى إشعاعات (فوتونات) كهرومغناطيسية صرفة. ويختفي π^0 تماما في العملية. ووُجِدَ أنّ كمية الطاقة الكهرومغناطيسية المتولدة مساوية تماما لتلك التي تنبأت بها صيغة آينشتاين، $E = mc^2$. وبشكل عام، فقد تمّ ملاحظة العملية العكسية أيضا في المختبر: فمن الممكن للأشعة الكهرومغناطيسية تحت ظروف معينة أن تتحول إلى أجسام مادية مثل الإلكترونات (انظر البند 27–6 حول إنتاج الثنائي، *Pair production*).

تبادل الكتلة والطاقة

* إنّ مبدأ كون الكتلة شكلاً من أشكال الطاقة يظهر للعيان بشكل جيد من مبدأ الكتلة النسبية (المعادلة 26–5). عندما يُبذلُ شغلٌ على جسمٍ ما، فستزداد طاقته الحركية. ولا تستطيع سرعة الجسم أن تزداد إلى ما لانهاية؛ لأنها لا تستطيع أن تكون أكبر من c. ومع هذا، فإنّ كتلة الجسم النسبية ستزداد. أي أنّ الشغل المبذول على الجسم لن يزيد من سرعة الجسم فقط، بل سيساهم أيضًا في زيادة كتلته.

وعلى نطاق واسع، فإنّ الطاقة المُولّدة في محطات الطاقة النووية هي نتيجة نقصان في الكتلة السكونية لوقود اليورانيوم خلال مروره بعملية تدعى الانشطار النووي (الفصل 31). وحتى الطاقة المُشَعة التي تصلنا من الشمس هي مثال على $E = mc^2$؛ تنقص كتلة الشمس باستمرار لتشع طاقة كهرومغناطيسية نحو الخارج.

ويعتقد حاليا أنّ العلاقة $E = mc^2$ تنطبق على العمليات جميعها، بالرغم من أنّ هذه التغييرات غالبا ما تكون صغيرة جدّا ويصعب قياسها. أي أنه عندما تتغير طاقة نظام ما بمقدار ΔE، فإنّ كتلته تتغير بمقدار Δm وتعطى كالتالي:

$$\Delta E = (\Delta m)(c^2) \qquad \textbf{(9–26)}$$

وفي التفاعل النووي، عندما تخرج طاقة ما E (أو تكون هناك حاجة إلى خروجها)، فإنّ الكتل المتفاعلة الناجمة ستختلف بمقدار $\Delta m = \Delta E/c^2$. وحتى عندما يُسخّنُ ماءٌ على موقدٍ، فمن المفترض ازدياد كتلته بمقدار ضئيل جدًّا.

المثال 8-26 طاقة البيون الحركية

حل المسألة

الطاقة الحركة النسبية

يتحرك ميزون π^0 $(m_0 = 2.40 \times 10^{-28}\,\text{kg})$ بسرعة $v = 0.80c = 2.4 \times 10^8\,\text{m/s}$. ما طاقته الحركية؟ قارن مع الحسابات التقليدية.

النّهج: نسبويّا، تعطى الطاقة الحركية (بالمعادلتين 26–6). وتقليديّا حسب $\text{KE} = \frac{1}{2}m_0v^2$.

الحل: الطاقة الحركية للميزون π^0 عند سرعة $v = 0.80c$ هي (المعادلة 26–6أ):

$$\begin{aligned}\text{KE} &= m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right)\\ &= (2.40 \times 10^{-28}\,\text{kg})(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})^2\left(\frac{1}{(1 - 0.64)^{\frac{1}{2}}} - 1\right)\\ &= 1.4 \times 10^{-11}\,\text{J}\end{aligned}$$

ولاحظ أنّ وحدات m_0c^2 هي $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ وهي الجول. وتعطي الحسابات التقليدية

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}m_0v^2 = \tfrac{1}{2}(2.4 \times 10^{-28}\,\text{kg})(2.4 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 6.9 \times 10^{-12}\,\text{J}$$

وهي نصف القيمة، ولكن هذه النتيجة ليست صحيحة.

ملحوظة: لا تحاول أن تحسب طاقة الحركة النسبية باستخدام المعادلة التقليدية مع الكتلة النسبية بدلاً من الكتلة السكونية (وهنا $m_{rel} = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2} = 4.0 \times 10^{-28}\,\text{kg}$)

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}(4.0 \times 10^{-28}\,\text{kg})(2.4 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 1.2 \times 10^{-11}\,\text{J}$$

المثال 9-26 الطاقة الناجمة عن الاضمحلال النووي

الطاقة الناجمة عن عملية نووية

تأتي الطاقة اللازمة أو الناجمة في التفاعلات النووية والاضمحلالات من التغيّر في الكتلة بين الجسيمات الابتدائية والنهائية. وفي نوعٍ واحدٍ من الاضمحلال الإشعاعي (الفصل 30)، تضمحلّ ذرة يورانيوم $(m = 232.03714\,\text{u})$ إلى ذرة ثوريوم $(m = 228.02873\,\text{u})$ إضافة إلى ذرة هيليوم $(m = 4.00260\,\text{u})$ حيث تعطى الكتل بدلالة وحدة الكتل الذرية $(1\,\text{u} = 1.6605 \times 10^{-27}\,\text{kg})$. احسب الطاقة الناجمة عن هذا الاضمحلال.

النّهج: الكتلة الابتدائية ناقص الكتلة الكلية النهائية يعطي الكتلة المفقودة بدلالة وحدة الكتل الذرية (u)، ثمّ نحولها إلى kg ونضربها في c^2 للحصول على الطاقة الناجمة، $\Delta E = \Delta m\, c^2$.

الحل: الكتلة الابتدائية هي $232.03714\,\text{u}$، والكتلة بعد الاضمحلال هي $228.02873\,\text{u} + 4.00260\,\text{u} = 232.03133\,\text{u}$ وعليه، فإنّ هناك نقصا في الكتلة بمقدار $0.00581\,\text{u}$. وتتحول هذه الكتلة المساوية لـ $(0.00581\,\text{u})(1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg}) = 9.64 \times 10^{-30}\,\text{kg}$ إلى طاقة. وبملك بواسطة $\Delta E = \Delta m\, c^2$:

$$\Delta E = (9.64 \times 10^{-30}\,\text{kg})(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 8.68 \times 10^{-13}\,\text{J}$$

وبما أنّ $1\,\text{MeV} = 1.60 \times 10^{-13}\,\text{J}$، فإنّ الطاقة الناجمة هي $5.4\,\text{MeV}$.

المثال 26-10 **تغير الكتلة في تفاعل كيميائي.**

عندما يتفاعل مولان من الهيدروجين مع مول واحد من الأكسجين لتكوين مولين من الماء، فإنّ الطاقة الناجمة هي 484 kJ. ما مقدار نقصان الكتلة في هذا التفاعل؟

النّهج : نستخدم مبدأ آينشتاين الرائع لتبادل الكتلة والطاقة $(E = mc^2)$.

الحلّ : باستخدام (المعادلة 26–9)، نحصل على التغير في الكتلة Δm:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{(-484 \times 10^3\,\text{J})}{(3.00 \times 10^8\,\text{m/s})^2} = -5.38 \times 10^{-12}\,\text{kg}$$

والكتلة الابتدائية للنظام هي $0.002\,\text{kg} + 0.016\,\text{kg} = 0.018\,\text{kg}$. ولذلك، فإنّ التغير في الكتلة نسبيّ وصغيرٌ جدّا ويمكن إهماله. [تحويل الكتل في العادة مبدأ معقول لتطبيقه على الأنظمة الكيميائية].

وحدات:
eV/c للزخم p
eV/c^2 للكتلة m

وفي عالم الذرات والأنوية بالغة الصغر، من الشائع أن تصنف الطاقات بدلالة الإلكترون فولت (eV) أو بمضاعفاته مثل $(10^6\,\text{eV})$. ويمكن وصف الزخم (انظر المعادلة 26–4) بالوحدات eV/c (أو MeV/c). في حين توصف الكتلة (من $E = mc^2$) بالوحدات eV/c^2 (أو MeV/c^2). ولاحظ استخدام c للإبقاء على صحة هذه الوحدات. لقد تمّ إثبات أنّ الكتلتين السكونيتين للإلكترون والبروتون هما $0.511\,\text{MeV}/c^2$ ، و $938\,\text{MeV}/c^2$ على الترتيب. انظر أيضًا إلى الجدول داخل الغلاف الأمامي.

المثال 26-11 **بروتون ذو 1-TeV**

يستطيع مُسارعُ تيفاترون في مختبر فيرمي في ولاية إلينوي تسريع البروتونات إلى طاقة حركية مقدراها $1.0\,\text{TeV}\,(10^{12}\,\text{eV})$. ما سرعة بروتون كهذا؟

النّهج: نحلّ باستخدام صيغة الطاقة الحركية (المعادلة 26–6أ) لإيجاد v.

الحلّ: إنّ الطاقة الحركية للبروتون هي $E_0 = 938\,\text{MeV}$ أو $9.38 \times 10^8\,\text{eV}$. ويمكن إهمال الطاقة السكونية بالمقارنة مع $\text{KE} = 10^{12}\,\text{eV}$، وبذلك نبسط (المعادلة 26 – 6أ) إلى:

$$\text{KE} \approx \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونحلّ لإيجاد v حسب الخطوات التالية:~

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0c^2}{\text{KE}};$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{m_0c^2}{\text{KE}}\right)^2;$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \left(\frac{m_0c^2}{\text{KE}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{9.38 \times 10^8\,\text{eV}}{1.0 \times 10^{12}\,\text{eV}}\right)^2;$$

$$v = \sqrt{1 - (9.38 \times 10^{-4})^2}\,c = 0.99999956c$$

وعليه، فإنّ البروتون يتحرك بسرعة تكاد تساوي c.

وعند السرعات المنخفضة $v \ll c$، فإنّ الصيغة النسبية لـ KE تؤول إلى تلك التقليدية، كما أثبتنا باستخدام المتمدّدة ذات الحدّين، $(1 \pm x)^n = 1 \pm nx + n(n-1)x^2/2! + \cdots$ ومع $n = -\frac{1}{2}$، تمدّد الجذر التربيعي في (المعادلة 26–6أ)

وبذلك يكون

$$\text{KE} = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right)$$

وهكذا

$$\text{KE} \approx m_0c^2\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \cdots - 1\right) \approx \tfrac{1}{2}m_0v^2$$

وتمثل النقاط في العبارة الأولى حدودا صغيرة جدا في المتمدّدة والتي أهملناها لافتراضنا بأنّ $v \ll c$.

وعليه

فعند السرعات المنخفضة، يُختزلُ الشكلُ النسبويُّ للطاقة الحركية إلى الشكل التقليدي $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ وهذا يجعل النسبيّة نظرية قابلة للتطبيق من حيث قدرتها على التنبؤ بنتائج دقيقة عند كلّ من السرعات المنخفضة والمرتفعة. وبالفعل، فإنّ معادلات النسبيّة الخاصّة الأخرى تختزل أيضا إلى مكافئاتها التقليدية عند السرعات الاعتيادية. ويختفي كلّ من تقلص الطول، وتمدّد الزمن، وتعديلات الزخم والطاقة الحركية عند $v \ll c$ لأنّ $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$ 1

ومن الممكن أيضًا اشتقاق علاقة مفيدة تجمع بين الطاقة الكلية E لجسمٍ ما وزخمه p. ويُعطى زخم جسم ما كتلته السكونية m_0 وسرعته v (بالمعادلة 26–4) كما يلي:

الزخم النسبوي

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v$$

الطاقة الكلية هي (المعادلة 26 – 7ب)

$$E = \gamma m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونربّع هذه المعادلة (ونضيف الحدّ "$v^2 - v^2$" وهو صفر، ولكنه سيساعدنا):

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^2 (v^2 - v^2 + c^2)}{1 - v^2/c^2}$$

$$= p^2c^2 + \frac{m_0^2 c^4 (1 - v^2/c^2)}{1 - v^2/c^2}$$

أو

الطاقة المرتبطة بالزخم

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2 c^4 \qquad \textbf{(10–26)}$$

ولذلك، فيمكن كتابة الطاقة الكلية بدلالة الزخم p، أو بدلالة الطاقة الحركية (المعادلة 26–7أ)، حيث افترضنا عدم وجود طاقة وضع.

*متى نستخدم الصيغ النسبية؟

من وجهة نظر عملية، فإننا لا نملك أيّ فرصة في حياتنا اليومية لاستخدام الرياضيات النسبية. وعلى سبيل المثال، فإنّ قيمة المعامل γ، الذي يظهر في كثير من الصيغ النسبية هي $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$، 1.005 عندما تكون $v = 0.10c$. ولذلك، فعند السرعات العالية مثل $0.10c = 3.0 \times 10^7\,\text{m/s}$، فإنّ المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ في الصيغ النسبية يعطي تصحيحا عدديّا أقل من 1%. ولسرعات أقل من $0.10c$، إلا إذا كانت الكتلة والطاقة قادرتين على أن تحل إحداهما محل الأخرى، فإننا لا نحتاج عادة إلى استخدام الصيغ النسبية الأكثر تعقيدا، ولكننا نستطيع استخدام الصيغ التقليدية الأبسط.

وإذا أعطيتَ كتلة الجسم السكونية m_0 وطاقته الحركية KE، فبإمكانك أن تقومَ بحسابٍ سريع لتحَدّد ما إذا كنت تحتاج إلى استخدام صيغ نسبوية، أو أنّ الصيغ التقليدية تفي بالغرض. وببساطةٍ، تحسب النسبة KE/m_0c^2؛ لأنّ (المعادلة 26 – 6ب)

$$\frac{\text{KE}}{m_0 c^2} = \gamma - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1$$

وإذا كانت نتيجة النسبيّة أقلّ، ولنقل من 0.01، فعليه $\gamma \le 1.01$، وستصحّحُ المعادلات النسبية تلك التقليدية بحوالي 1%. أمّا إذا كانت دقتك المتوقعة ليست أفضل من 1%، فإنّ الصيغ التقليدية تكون جيدة بما فيها الكفاية. ولكن إذا كانت دقتك جزءا واحدا من 1000 (0.1%)، فعليك استخدام الصيغ النسبية. في حين إذا كانت دقتك المتوقعة هي 10% فقط، فإنك بحاجة إلى النسبيّة إذا كانت $0.1 \gtrsim (\text{KE}/m_0c^2)$.

تمرين هـ: لأجل دقّة 1%، هل يجب أن نتعامل مع إلكترون طاقته الحركية $\text{KE} = 100\,\text{eV}$ نسبويًّا؟ [مساعدة: كتلة الإلكترون السكونية = 0.511 MeV].

10-26 جمع السّرعات نسبويًا

افرض أنّ سفينة صاروخية تنتقل مبتعدة عن الأرض بسرعة v. وافرض كذلك أنّ هذا الصاروخ قد أطلق صاروخا ثانيا يتحرك بسرعة u' بالنسبة إلى الصاروخ الأول (الشكل 26–10). ويمكن أن نتوقع أن u سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض هي $u = v + u'$. وبالنسبة إلى الحالة المبينة في (الشكل 26–10) فهي $u = 0.60c + 0.60c = 1.20c$. ولكن، وحسب ما تمّ مناقشته في (البند 26–8)، فإنه لا يوجد أيّ جسم يستطيع أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء في أيّ إطار مرجعي. وبالفعل، وضح آينشتاين أنّه وبسبب تغيّر الطول والزمن باختلاف الأطر المرجعية، فإنّ الصيغة القديمة لجمع السرعات المتجهة أصبحت غير صالحة. وبدلاً من ذلك، فإنّ الصيغة الصحيحة هي:

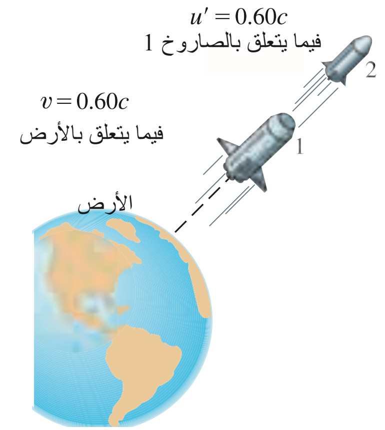
$$u = \frac{v + u'}{1 + vu'/c^2}$$ [$\vec{u}$ و $\vec{v}$ على امتداد الاتجاه نفسه] **(26–11)**

تنويه:

لا تجمع السرعات النسبيّة ببساطة كما تجمع في الميكانيكا التقليدية ($v \ll c$)

صيغة الجمع النسبيّ للسرعات ($\vec{u}$ و $\vec{v}$ على امتداد الخط نفسه)

لحركة على امتداد خط مستقيم. ولقد قمنا باشتقاق هذه الصيغة في الفهرس هـ. إذا كانت u' في الاتجاه المعاكس لـ v، عندها يجب أن تكون إشارتها سالبة في المعادلة أعلاه. وعليه، $u = (v - u')/(1 - vu'/c^2)$



الشكل 26-10 أطلق الصاروخ 2 من الصاروخ 1 بسرعة $u' = 0.60c$. ما سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض؟

المثال 26-12 السرعة النسبيّة، نسبويًا

احسب سرعة الصاروخ 2 في (الشكل 26–10) بالنسبة إلى الأرض.

النّهج: نضيف سرعة الصاروخ 2 نسبة إلى الصاروخ 1، إلى سرعة الصاروخ 1 نسبة إلى الأرض، باستخدام (المعادلة النسبية 26–11) بسبب ارتفاع قيم السرعات، وبسبب كونها على امتداد الخط نفسه أيضا.

الحلّ: يتحرك الصاروخ 2 بسرعة $u' = 0.60c$ نسبة إلى الصاروخ 1. وسرعة الصاروخ 1 $v = 0.60c$ نسبة إلى الأرض. إنّ سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض هي (المعادلة 26 – 11)

$$u = \frac{0.60c + 0.60c}{1 + \frac{(0.60c)(0.60c)}{c^2}} = \frac{1.20c}{1.36} = 0.88c$$

ملحوظة: وُجدت سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض على أنّها أقلّ من c، كما يجب أن تكون.

ويمكننا أن نرى بأنّ (المعادلة 26–11) تختزل إلى الشكل التقليدي عند السرعات الصغيرة مقارنة بسرعة الضوء؛ لأنّ $1 + vu'/c^2 \approx 1$ لـ v و $u' \ll c$. ولذلك، فإنّ $u \approx v + u'$ كما في الفيزياء التقليدية (الفصل 3).

والآن، سنختبر هذه الصيغة في حالة أخرى، أي في حالة سرعة الضوء. لنفترض أنّ الصاروخ في (الشكل 26–11) يُصدرُ شعاعا ضوئيّا بحيث $u' = c$. وتخبرنا (المعادلة 26–11) أنّ سرعة الضوء الصادر هذا بالنسبة إلى الأرض هي

$$u = \frac{0.60c + c}{1 + \frac{(0.60c)(c)}{c^2}} = \frac{1.60c}{1.60} = c$$

وهي متوافقة تماما مع المُسلّمة الثانية للنسبيّة.

تمرين و: استخدم (المعادلة 26–11) لحساب سرعة الصاروخ 2 في (الشكل 26–10) بالنسبة إلى الأرض إذا أطلق من الصاروخ 1 بسرعة $u' = 3000\ \text{km/s} = 0.010c$. افرض أنّ سرعة الصاروخ 1 كانت $v = 6000\ \text{km/s} = 0.020c$.

11-26 تأثير النّسبيّة الخاصة

لقد تمّ إجراءُ عددٍ كبير من التجارب لاختبار تنبؤات نظرية النسبيّة الخاصّة، ولم تسجل أيّ تناقضات ضمن الأخطاء العملية المقبولة. ولذلك، فقد قبل العلماء النسبيّة على أنها وصف دقيق للطبيعة.

عند سرعات أقلّ بكثيرٍ من سرعة الضوء، تختزل الصيغ النسبية إلى نظيراتها التقليدية القديمة، كما ذكر سابقًا. ونأمل بالطبع، بل ونصرّعلى أنّ هذا صحيح؛ لأنّ الميكانيكا النيوتونية تعمل بشكل رائع للأجسام المتحركة بسرعات $v \ll c$. ويُدعى هذا الإصرار على أنّ نظريّة عامّة (مثل النسبيّة) تعطي النتائج نفسها كما تعطيها نظريّة أكثر خصوصيّة (مثل الميكانيكا التقليدية التي تعمل عند $v \ll c$) مبدأ التوافق، فتتوافق النظريتان في مناطق تقاطعهما. ولذلك، فإنّ النسبيّة لا تتعارض مع الميكانيكا الكلاسيكية(التقليدية). وبالأحرى فهي نظريّة أكثر عموميّة، بل تعدّ الميكانيكا التقليدية حالة خاصّة منها.

مبدأ التطابق

ولا تقتصر أهمية نظريّة النسبيّة في أنها تعطي نتائج أكثر دقة، خصوصًا عند السرعات العالية، ولكنها أكثر من ذلك بكثير؛ لقد غيّرت الطريقة التي ننظر بها إلى العالم. وأصبح ينظر الآن إلى مبدأي الفضاء والزمن على أنهما نسبويّان ومترابطان مع بعضهما بعضا، في حين كان ينظر إليهما في السابق على أنهما مطلقان ومنفصلان. وحتى مفاهيمنا عن المادة والطاقة تغيرت؛ فالجديد في الأمر أنه يمكن تحوّل أيّ منهما إلى الأخرى. وقد امتد تأثير النسبيّة إلى أبعد بكثير من الفيزياء، من خلال تأثيرها في العلوم الأخرى، وخاصة في عالمي الفن والأدب، وقد دخلت بالفعل في الثقافة العامة.

ومع هذا،

فمن وجهة نظر عملية بحتة، فنحن لا نملك أيّ فرصة لاستخدام رياضيات النسبيّة في حياتنا اليومية . وعلى سبيل المثال، فإنّ قيمة المعامل γ، $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ الذي يظهر في الصيغ النسبية، هي 1.005 فقط. وحتى للسرعات المرتفعة التي قد تصل إلى $0.10c = 3.0 \times 10^7\,\text{m/s}$ لاتعطي تصحيحا أقل من 1%. وعند سرعات أقل من $0.10c$، إلا إذا كانت الكتلة والطاقة قادرتين على أن تحلّ إحداهما محلّ الأخرى، فإنّنا لا نحتاج عادة إلى استخدام الصيغ النسبية الأكثر تعقيدا، بل نستطيع استخدام الصيغ التقليدية الأبسط.

وتتعامل نظرية النسبيّة الخاصّة التي درسناها في هذا الفصل مع الأُطر المرجعية القصورية (غير المتسارعة). وسوف نناقش"نظرية النسبيّة العامة" الأكثر تعقيدا في (الفصل 33) باختصار، والتي تستطيع التعامل مع الأطر المرجعية غير القصورية.

ملخص

إنّ **الإطار المرجعي القصوري** هو إطار ينطبق فيه قانون نيوتن للقصور. ويمكن للأطر المرجعية القصورية أن تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة إلى بعضها بعضا، والأطر المرجعية المتسارعة **غير قصورية**.

تعتمد **نظرية النسبيّة الخاصة** على مبدأين هما: **مبدأ النسبيّة** الذي ينصّ على أنّ قوانين الفيزياء لا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها، ومبدأ **ثبات سرعة الضوء** الذي ينصّ على أنّ سرعة الضوء في الفضاء الخالي هي نفسها في الأطر المرجعية القصورية جميعها.

إحدى نتائج نظرية النسبيّة هي أنّ حدثين متزامنين في إطار مرجعي قد لا يكونان متزامنين في إطار آخر. وأثران آخران هما: **تمدّد الزمن**؛ قيست الساعات المتحركة فوجد أنها تتحرك ببطء، **وتقلص الطول**؛ قيس طول جسم متحرك (في اتجاه حركته نفسه) فوُجد أنه أقصر منه في حالة السكون. وكميّا،

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \gamma\,\Delta t_0 \qquad \textbf{(1–26)}$$

$$L = L_0\sqrt{1-v^2/c^2} = \frac{L_0}{\gamma} \qquad \textbf{(3–26)}$$

حيث L و Δt هما الطول والفترة الزمنية للأجسام (أو الأحداث) المُلاحظة خلال حركتها بسرعة v.

L_0 و Δt_0 هما **الطول الصحيح والزمن الصحيح**؛ أي أنّهما الكميتان المقيستان في الإطار السكوني للأجسام أو الأحداث. والكمية γ هي اختصار لـ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \textbf{(2–26)}$$

غيرت نظرية النسبيّة أفكارنا العامّة عن كلّ من الفضاء، والزمن، والطاقة، والكتلة. ويُرى كلّ من الفضاء والزمن على أنهما مترابطان بشدة. ويُعدّ الزمن البعد الرابع إضافة إلى الأبعاد الثلاثة للفضاء. ويُعطى **الزخم** لجسم ما كالتالي:

$$p = \gamma m_0 v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \textbf{(4–26)}$$

هذه الصيغة على أنها **ازدياد كتلة**، أما الكتلة النسبية فهي

$$m_{rel} = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \textbf{(5–26)}$$

و m_0 هي **الكتلة السكونية** للجسم $(v = 0)$.

إنّ الكتلة والطاقة كميتان متحولتان. وتخبرنا المعادلة

$$E_0 = m_0c^2 \quad (8\text{–}26)$$

عن مقدار الطاقة E الضرورية لتكوين m_0، أو العكس. وبطريقة أخرى، فإنّ $E_0 = m_0c^2$ هي مقدار الطاقة التي يمتلكها الجسم بسبب كتلته m_0. ويجب أن يضمّ قانون حفظ الطاقة الكتلة على أنه شكلٌ من أشكال الطاقة. وتُعطى الطاقة الحركية KE لجسم يتحرك بسرعة v كالتالي:

$$\text{KE} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 \quad (6\text{–}26)$$

حيث m_0 هي الكتلة السكونية للجسم. والطاقة الكلية E، في حالة عدم وجود طاقة وضع، هي

$$E = \text{KE} + m_0c^2 = \gamma m_0c^2 \quad (7\text{–}26)$$

ويرتبط الزخم p لجسم ما بطاقته الكلية E (مفترضًا عدم وجود طاقة وضع) بواسطة

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4 \quad (10\text{–}26)$$

ويجب إجراء الجمع الاتجاهي للسرعة بطريقة خاصة. وتظهر أهمية هذه الظواهر النسبية عند السرعات المرتفعة والقريبة فقط من سرعة الضوء والتي تشكل بحدّ ذاتها النهاية العليا للسرعة في الكون.

أسئلة

1. إذا كنت داخل عربة قطار لا تحتوي على أيّ شباك، وكان القطار يتحرك بسرعة ثابتة سلسة جدّا، فهل هناك أيّ تجربة عملية تستطيع إجراءها في عربة القطار لتحدد ما إذا كان القطار متحركاً؟ فسّر.

2. ربما تكون قد مررت بتجربة عندما كنت في سيارتك تقف أمام إشارة مرور ضوؤها أحمر، لترى بطرف عينك أنّ هناك سيارة خلفك تتحرك باتجاهك نحو الأمام ببطء شديد، فقمت بالضغط بشدة على كوابح السيارة ظنّا منك أنّك ترجع إلى الخلف. ما علاقة هذا بالحركتين؛ المطلقة والنسبيّة؟

3. يقف عامل على قمة عربة قطار متحرك، ويرمي كرة ثقيلة إلى الأعلى مباشرة (من وجهة نظره). مع إهمال مقاومة الهواء، هل ستسقط الكرة على العربة أم خلفها؟

4. هل تدور الأرض فعلاً حول الشمس؟ أو هل من الصحة أن نقول أيضًا بأنّ الشمس تدور حول الأرض؟ ناقش في ضوء المبدأ الأوّل للنسبيّة (لا يوجد إطار مرجعي مفضل). فسّر.

5. إذا كنت على سفينة فضاء تنتقل بمعدل $0.5c$ بعيدا عن نجم ما، فما سرعة مرور ضوء النجم بجانبك؟

6. يُعبَّرُ في بعض الأحيان عن ظاهرة تمدّد الزمن كما يلي: "تتقدّمُ الساعات المتحركة ببطء". ` وفي الحقيقة، ليس لهذه الظاهرة أيّ صلةٍ بالحركة المؤثرة في عمل الساعات. فما الذي تؤثر فيه إذن؟

7. هل يعني تمدّد الزمن أنّه يمرّ ببطء أكبر في الأطر المرجعية المتحركة؟ أم أنّه يبدو وكأنّه يمرّ ببطء أكبر فقط ؟

8. وصلت رائدة فضاء يافعة إلى موطنها بعد رحلة طويلة. وحال وصولها، أسرعت باتجاه رجلٍ مسنّ رمادي الشعر لتخاطبه مشيرة إليه خلال الحديث على أنه ابنها. كيف يمكن لهذا أن يكون؟

9. هل يمكن أن تلاحظ تغيرا في نبضات قلبك وأنت تسافر مبتعدا عن الأرض بسرعة $0.5c$؟ وهل سيتغير أيّ من كتلتك، أو طولك، أو عرض خصرك؟ وماذا سيقول عنك مراقبون على الأرض ينظرون إليك من خلال المنظار المكبر؟

10. هل يحدث تمدّد الزمن وتقلص الطول عند السرعات الاعتيادية، ولنقل عند $90\ \text{km/h}$؟

11. افرض أنّ سرعة الضوء لانهائية. عندئذٍ، ماذا سيحدث للتنبؤات النسبية من تقلص الطول وتمدّد الزمن؟

12. ناقش ماذا سيحدث أو سيختلف في حياتنا اليومية لو أنّ سرعة الضوء كانت $25\ \text{m/s}$؟

13. فسّر كيف يمكن استخدام صيغتي تقلص الطول وتمدّد الزمن للدلالة على أن c هي السرعة العليا في الكون.

14. يظهر الرسم في بداية هذا الفصل الشارع كما يراه السيد تومبكن، حيث سرعة الضوء $c = 20\ \text{mi/h}$. كيف يبدو السيد تومبكن للناس الواقفة في الشارع (الشكل 26–11)؟ فسّر.



الشكل 26–11 (السؤال 14). السيّد تومبكن كما يراه الناس على جانب الطريق. انظر أيضا إلى الصورة في بداية الفصل.

15. يتحرك الإلكترون بسرعات محدودة أقلّ من c. فهل يضع هذا حدًّا أعلى لزخم الإلكترون؟ وإذا كان الأمر كذلك، فما هذا الحدّ الأعلى؟ وإن كان الجواب "لا"، ففسّر.

16. هل يمكن لجسم كتلته السكونية لا تساوي صفرًا أن يصل إلى سرعة الضوء؟

17. هل تتناقض المعادلة $E = mc^2$ مع مبدأ حفظ الطاقة؟ فسّر.

18. إذا كانت الكتلة شكلاً من أشكال الطاقة، فهل يعني هذا أنّ الزنبرك سيمتلك كتلة أكبر عندما يكون مضغوطا بالمقارنة معه عندما لايكون كذلك؟

19. ليس صحيحًا القول بأنّ: " لا تفنى المادة ولا تستحدث من عدم". ما الذي يجب قوله بدلاً من ذلك ؟

20. هل فكرتنا العامة عن جمع السرعات المتجهة هي ببساطة كما عملنا في (البند 3–8)، أم هي خطأ تماما؟

26–4 و 26–5 تمدّد الزمن وتقلّص الطّول

.1 (I) تمرّ سفينة فضاء عنك بسرعة $0.750c$. فإذا قست طول السفينة ووجدته $28.2\ m$، فما طول السفينة وهي في حالة السكون؟

.2 (I) ينتقل جسيم أولي من نوع ما بسرعة $2.70 \times 10^8\ m/s$. وقيس عمره عند هذه السرعة فوجد أنه $4.76 \times 10^{-6}\ s$. ما عمر الجسيم الساكن؟

.3 (I) تعتمد الأطوال والفترات الزمنية على المعامل حسب نظرية النسبيّة (المعادلتان 26–1 و26–3). قيّم هذا المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ عند السرعات: (أ) $v = 20{,}000\ m/s$ (سرعة اعتيادية لقمر صناعي). (ب) $v = 0.020c$ (جـ) $v = 0.200c$ (د) $v = 0.95c$ (هـ) $v = 0.98c$ (و) $v = 0.999c$.

.4 (II) إذا كنت ستسافر إلى نجم يبتعد مسافة 125 سنة ضوئية عن الأرض بسرعة $2.50 \times 10^8\ m/s$، فكم ستجد هذه المسافة؟

.5 (II) ما سرعة بيون إذا كان متوسط عمره المقيس هو $4.10 \times 10^{-8}\ s$؟ متوسط عمره في وضع السكون هو $2.60 \times 10^{-8}\ s$.

.6 (II) في إطار الأرض المرجعي، يبتعد نجم عن الأرض مسافة 82 سنة ضوئية. ما سرعة انتقالك الضرورية لكي تصبح المسافة بالنسبة إليك 35 سنة ضوئية فقط؟

.7 (II) لنفترض أنك قررت السفر إلى نجم يبتعد مسافة 85 سنة ضوئية بسرعة ما بحيث تبدو لك المسافة على أنها 25 سنة ضوئية فقط. كم سنة ستستغرق هذه الرحلة؟

.8 (II) ما السرعة v التي ستجعل عصا طولها $1.00\text{-}m$ تبدو أقصر بمقدار 10.0% $(90.0\ cm)$؟

.9 (II) سرعة الإفلات من الأرض $40{,}000\ km/h$. ما نسبة نقصان طول سفينة فضاء طولها $95.2\text{-}m$ تسافر بهذه السرعة؟

.10 (II) عند أيّ سرعة ستختلف الصيغ النسبية لكلّ من: (أ) الطول؟ (ب) الفترات الزمنية عن القيم التقليدية بمقدار 1.00%؟ (هذه طريقة معقولة للتقدير عند استخدام الحسابات النسبية بدلاً من التقليدية).

.11 (II) لنفترض أنّ تقريرا صحفيا قد أخبرنا أنّ سفينة النجوم "انتربرايز" قد عادت من رحلة مدتها 5 سنوات وهي تنتقل بسرعة $0.84c$. (أ) إذا كان التقرير يعني أنّ السنوات الخمس هي من زمن الأرض، فكم انقضى من الوقت على السفينة؟ (ب) إذا عنى التقرير أنّ السنوات هي من زمن السفينة، فكم انقضى من الوقت على الأرض؟

.12 (II) يبتعد نجم ما 10.6 سنة ضوئية. فكم من الزمن سيستغرق سفينة فضاء تنتقل بـ $0.960c$ للوصول إلى ذلك النجم من الأرض كما قاسه مراقبون: (أ) على الأرض؟ (ب) على سفينة الفضاء؟ (جـ) ما المسافة المقطوعة حسب مراقبين على سفينة الفضاء؟ (د) كيف سيحسب راكبو سفينة الفضاء سرعتهم من النتائج في (ب) (جـ)؟

.13 (II) تمّر صديقتك عنك وهي تركب سفينتها الفضائية "الفراري" بسرعة $0.660c$. إذا قست أبعاد سفينتها من إطارك ووجدت أنّ طولها $4.80\ m$ وارتفاعها $1.25\ m$. (أ) ما طول السفينة وهي ساكنة وارتفاعها؟ (ب) كم ثانية انقضت حسب ساعة صديقتك إذا انقضى $20.0\ s$ حسب ساعتك؟ (جـ) ما سرعة انتقالك كما تبدو لصديقتك؟ (د) كم ثانية ستقول هي أنّها انقضت حسب ساعتك عندما تنقضي $20.0\ s$ حسب ساعتها؟

.14 (II) كم تبلغ السرعة التي يجب أن ينتقل بها بيون متوسط ليقطع مسافة $15\ m$ قبل أن يضمحل؟ متوسط عمره في وضع السكون $2.6 \times 10^{-8}\ s$.

26 – 7 الزخم النسبويّ

.15 (I) ما زخم بروتون يتحرك بسرعة $v = 0.85c$؟

.16 (I) عند أيّ سرعة ستصبح كتلة الجسم النسبية ضعف كتلته السكونية؟

.17 (II) يسافر جسم كتلته السكونية m_0 بسرعة $v = 0.20c$. عند أيّ سرعة سيتضاعف زخمه؟

.18 (II) (أ) يسافر جسم بسرعة $v = 0.10c$. ما نسبة الخطأ في حسابات الزخم عند استخدام الصيغة التقليدية؟ أعد الحل مستخدما $v = 0.50c$.

.19 (II) ما نسبة التغير في الزخم لبروتون يتسارع: (أ) من $0.45c$ إلى $0.90c$؟ (ب) من $0.90c$ إلى $0.98c$؟

26–9 $E = mc^2$

.20 (I) يتطلب تفاعل كيميائي ما $4.82 \times 10^4\ J$ من الطاقة المدخلة لحدوثه. ما الزيادة في كتلة المنتجات مقارنةً بتلك التي للمتفاعلات؟

.21 (I) عندما تنقسم نواة اليوارنيوم الساكنة في عملية تعرف بالانشطار في مفاعل نووي، تمتلك الشظايا الناجمة طاقة حركية تقترب من $200\ MeV$. ما مقدار الكتلة المفقودة خلال العملية؟

.22 (I) احسب الطاقة السكونية لإلكترون بدلالة الجول والإلكترون فولت $(1\ MeV = 1.60 \times 10^{-13}\ J)$.

.23 (I) احسب طاقة البروتون السكونية بدلالة MeV/c^2.

.24 (I) الطاقة الكلية السنوية المستهلكة في الولايات المتحدة هي حوالي $8 \times 10^{19}\ J$. ما مقدار الكتلة اللازم تحويلها إلى طاقة لتلبية هذه الحاجة؟

.25 (II) ما مقدار الطاقة التي يمكن الحصول عليها من تحويل $1.0\ gm$ من الكتلة؟ ما مقدار الكتلة التي تستطيع هذه الطاقة رفعها إلى $0.25\ km$ فوق سطح الأرض؟

.26 (II) ما سرعة جسمٍ ما عندما تتساوى طاقتاه: الحركية و السكونية؟

.27 (II) ما السرعة التي ستكون عندها الطاقة الحركية لجسم ما تساوي 25% من طاقته السكونية؟

.28 (II) (أ) ما مقدار الشغل اللازم لتسريع بروتون من السكون إلى سرعة $0.997c$؟ (ب) كم سيصبح زخم هذا البروتون؟

.29 (II) احسب الطاقة الحركية والزخم لبروتون ينتقل بسرعة $2.60 \times 10^8\ m/s$.

.30 (II) ما زخم بروتون $750\text{-}MeV$ (أي أنّ طاقته الحركية تساوي $750\text{-}MeV$)؟

.31 (II) ما سرعة بروتون يتسارع بواسطة فرق جهد مقداره $105\ MV$؟

.32 (II) ما سرعة إلكترون طاقته الحركية $1.00\ MeV$؟

.33 (II) ما سرعة الإلكترون مباشرة قبل أن يصطدم بشاشة تلفاز بعد تسريعه من السكون بواسطة $25{,}000\ V$ ناجمة عن أنبوب الصور؟

.34 (II) يقترب جسيمان متماثلان من بعضهما بعضًا. كتلة كلٍّ منهما السكونية m_0، بسرعتين متساويتين بالمقدار ومتعاكستين بالاتجاه. وإذا كان التصادم غير مرن كليًّا ونتج عنه جسم ساكن ووحيد، فما الكتلة السكونية للجسم الناتج؟ وما مقدار الطاقة المفقودة خلال التصادم؟ وما مقدار الطاقة الحركية المفقودة خلال هذا التصادم؟

35. (II) احسب سرعة بروتون $(m_0 = 1.67 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg})$ طاقته الحركية هي تماماً نصف: (أ) طاقته الكلية. (ب) طاقته السكونية.

36. (II) ما سرعة إلكترون وزخمه $(m = 9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})$ إذا تساوت طاقتاه الحركية و السكونية؟

37. (II) لنفترض أنّ سفينة كتلتها 27,000 kg قد سُرّعت إلى $0.21c$. (أ) ما مقدار ما ستمتلكه من طاقة حركية؟ (ب) إذا استخدمت الصيغة التقليدية للطاقة الحركية، فما نسبة خطئك؟

38. (II) احسب الطاقة الحركية والزخم لبروتون $(m_0 = 1.67 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg})$ يتحرك بسرعة $7.35 \times 10^7\,\mathrm{m/s}$. ما نسبة الخطأ في حساباتك الناجمة عن استخدامك الصيغ التقليدية؟

39. (II) تضمحل نواة أماريكيوم، $^{142}_{95}\mathrm{Am}$ إلى نواة نبتونيوم $^{732}_{39}\mathrm{NP}$، بعد أن تبعث جسيم ألفا كتلته 4.00260 u وطاقة حركته 5.5 MeV قدّر كتلة نواة النبتونيوم إذا أهملت ارتدادها، وعلمت أنّ كتلة أماريكيوم 241.05682 u.

40. (II) إذا سُرّع إلكترونٌ $(m_0 = 9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})$ من السكون إلى سرعة v بواسطة قوة محافظة، فستقلّ طاقته الحركية بمقدار $6.60 \times 10^{-14}\,\mathrm{J}$. حدّد سرعة الإلكترون v.

41. (II) ارسم مخططا للطاقة الحركية مقابل الزخم لـ جسم: (أ) كتلته السكونية لا تساوي صفرا. (ب) كتلته السكونية صفر.

42. (II) ما شدة المجال المغناطيسي الضرورية لإبقاء بروتون طاقته 998-GeV بروتون يدور في دائرة نصف قطرها 1.0 km (ولنقل في سنكروترون مختبر فيرمي)؟ استخدم الكتلة النسبية. كتلة البروتون السكونية هي:

$$0.938\,\mathrm{GeV}/c^2.\ (1\,\mathrm{GeV} = 10^9\,\mathrm{eV})$$

مساعدة: في النسبة، ما زالت القيمة $mv^2/r = qvB$ صحيحة في المجال المغناطيسي.

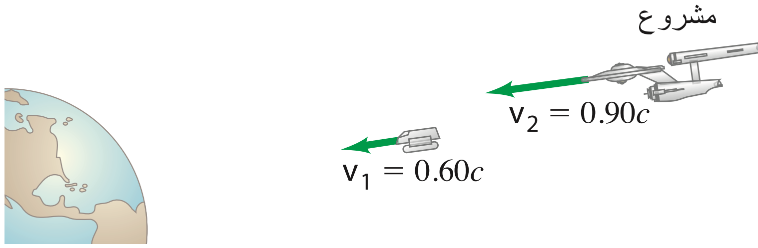
10–26 جمع السرعات النسبويّ

43. (I) يلاحظ شخص في صاروخ ينتقل بسرعة $0.50c$ (بالنسبة إلى الأرض) شهابًا يأتي من خلفه ويمرّ عنه بسرعة، وعندما قاسها وجدها 0.50c. كم تبلغ سرعة الشهاب بالنسبة إلى الأرض؟

44. (II) تغادر سفينتا فضاء الأرض في اتجاهين متعاكسين، كلّ منهما بسرعة $0.50c$ بالنسبة إلى الأرض. (أ) ما سرعة سفينة الفضاء 1 بالنسبة إلى السفينة 2؟ (ب) ما سرعة سفينة الفضاء 2 بالنسبة إلى السفينة 1؟

45. (II) تغادر سفينة فضاء الأرض بسرعة $0.71c$. وتغادر سفينة فضاء ثانية من السفينة الأولى بسرعة $0.87c$ بالنسبة إليها. احسب سرعة السفينة الثانية بالنسبة إلى الأرض إذا أطلقت: (أ) في اتجاه حركة السفينة الأولى نفسه. (ب) مباشرة إلى الخلف باتجاه الأرض.

46. (II) يرى مراقبٌ على الأرض سفينةً مخلوقات فضائية تقترب بسرعة $0.60c$ وتأتي الإنتربرايز للنجدة (الشكل 26–12) لتفاجيء المخلوقات الفضائية وهي تسير مباشرة باتجاه الأرض بسرعة $0.90c$ بالنسبة إلى الأرض. ما السرعة النسبية لإحدى السفينتين كما تمت رؤيتها من قبل الثانية؟



47. (II) ترسل سفينة فضاء منكوبة حجرتي نجاة في اتجاهين متضادين. تتحرك الأولى بسرعة $v_1 = -0.60c$ في اتجاه ما، في حين تتحرك الأخرى بسرعة $v_2 = +0.70c$ في الاتجاه الآخر كما تمّت ملاحظتها من سفينة الفضاء. ما سرعة حجيرة النجاة الثانية كما تمّ قياسها من حجيرة النجاة الأولى؟

48. (II) يمرّ صاروخ A عن الأرض بسرعة $0.75c$. وفي الوقت نفسه يمرّ صاروخ B عن الأرض وهو يتحرك في الاتجاه نفسه بسرعة $0.95c$. بالنسبة إلى الأرض. ما سرعة B بالنسبة إلى A عندما يتجاوزه؟

مسائل عامة

49. إنّ أقرب نجم إلى الأرض هو بروكسيما سينتوري، وهو بعيد مسافة 4.3 سنة ضوئية. (أ) ما السرعة الثابتة التي يجب أن تسير بها سفينة فضاء من الأرض إذا أرادت أن تصل النجم في 4.0 سنوات كما يقيسها المسافرون على سفينة الفضاء؟ (ب) كم ستستغرق الرحلة كما سيراها المراقبون على الأرض؟

50. كقاعدة، أيّ شيء يسافر أسرع من 0.1c تقريبًا يُسَمّى نسبويًّا، وتصحيحه باستخدام النسبيّة الخاصّة يؤثر فيه بشكل واضح. حدّد سرعة الإلكترون في ذرّة الهيدروجين (نصف قطرها $0.5 \times 10^{-10}\,\mathrm{m}$) هل هي نسبويّة ؟ (تعامل مع الإلكترون كما لو أنه في فلك دائري حول البروتون).

51. (أ) ما سرعة إلكترون v طاقته الحركية تساوي 14,000 ضعف طاقته السكونية؟ تستطيع أن تعرف الفرق، $c - v$. ويمكن الوصول إلى هذه السرعات في مسارع ستانفورد الخطي (SLAC). (ب) إذا انتقلت الإلكترونات في المختبر خلال أنبوب طوله 3.0 km (كما في SLAC)، فما طول الأنبوب نسبة إلى إطار الإلكترون المرجعي ؟ [مساعدة: استخدم المتمددّة ذات الحدين].

52. كم غرامًا من المادة يستهلك كليًّا لإضاءة مصباح ضوئيّ قدرته 100-W لمدة عام واحد؟

53. ما كميّةُ الطاقة الكهرومغناطيسية الدنيا اللازمة لإنتاج إلكترون وبوزيترون معا؟ البوزيترون هو جسيم له كتلة الإلكترون السكونية نفسها، ولكنه يمتلك شحنة معاكسة. (لاحظ أنّ الشحنة الكهربائية محفوظة في هذه العملية. (انظر البند 27–6).

54. يدخل إلكترون $(m = 9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})$ مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا $B = 1.8\,\mathrm{T}$ ، ويتحرك عموديًّا على خطوط المجال بسرعة $v = 0.92c$. ما نصف قطر مساره الدائري؟ انظر تلميح (المسألة 42).

55. يصطدم ميون سالب يتحرك بسرعة تعادل 33% من سرعة الضوء مباشرة مع ميون موجب يتحرك بسرعة تعادل 50% من سرعة الضوء . ما مقدار الطاقة الكهرومغناطيسية الناجمة عن إلغاء الجسيمين كلّ منهما الآخر (كتلة كلّ منهما السكونية $105.7\,\mathrm{MeV}/c^2$)؟

56. يستطيع نيوترون حرّ أن يضمحل إلى بروتون، وإلكترون، ونيترينو. افرض أنّ كتلة النيوترينو السكونية صفر، وأنّ الكتل الأخرى يمكن أن نجدها في الجدول داخل غلاف الكتاب الأمامي. حدّد الطاقة الحركية الكلية المشتركة بين الجسيمات الثلاثة عندما يضمحل نيوترون ساكن.

57. تشعّ الشمس بمعدل $4 \times 10^{26}\,\mathrm{W}$. (أ) ما معدل تناقص كتلة الشمس؟ (ب) كم تستغرق الشمس لتخسر كتلة مساوية لكتلة الأرض؟ (جـ) قدّر زمن بقاء الشمس لو أنها أشعت باستمرار بهذا المعدّل.

58. قيس جسيم مجهول فوُجِدَ أنه يمتلك شحنة سالبة، وسرعة مقدارها $2.24 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$. وتمّ تحديد زخمه فوُجد أنه $3.07 \times 10^{-22}\,\mathrm{kg \cdot m/s}$. حدّد الجسيم بإيجاد كتلته السكونية؟

59. ما مقدار الطاقة اللازمة لتفكيك نواة هيليوم إلى مكوناتها: بروتونين ونيوترونين؟ الكتل السكونية للبروتون (ومعه الإلكترون) والنيوترون والهيليوم على الترتيب هي $1.00783\,\mathrm{u}$، و $1.00867\,\mathrm{u}$، و $4.00260\,\mathrm{u}$. (يُدعى فرق الطاقة هذا بطاقة الربط الكلية لنواة الهيليوم $^4_2\mathrm{He}$).

60. ما الزيادة المئوية في الكتلة (النسبية) لسيارة تسير بسرعة $110\,\mathrm{km/h}$ مقارنة بكتلتها وهي ساكنة؟ [مساعدة: استخدم المتمدّدة ذات الحدّين].

61. بروتونان، سرعة كلّ منهما $0.935c$ داخل المختبر، ويتحركان باتجاه بعضهما بعضا. حدّد زخم: (أ) كلّ بروتون في المختبر. (ب) البروتونين في المختبر. (جـ) أحد البروتونين كما يشاهده البروتون الآخر.

62. أثبت بالتحليل أنّ سرعة جسم ما زخمه p، وطاقته E تعطى كالتالي:

$$v = \frac{pc^2}{E} = \frac{pc}{\sqrt{m_0^2c^2 + p^2}}$$

63. تتزود سفينة النجوم الصورية إنتربرايز بطاقتها عن طريق دمج المادة ومضادها لتحقق تحويل كامل للكتلة إلى طاقة. إذا كانت كتلة الإنتربرايز $5 \times 10^9\,\mathrm{kg}$ تقريبا . فما مقدار الكتلة اللازم تحويلها إلى طاقة حركية لتسريع السفينة من السكون إلى عُشْرِ سرعة الضوء؟

64. سُرّعَ إلكترونٌ لدرجة أنّ طاقته الحركية أصبحت أكبر من طاقته السكونية m_0c^2 بمقدار : (أ) 5.00 أضعاف. (ب) 999 ضعفا. ما سرعة الإلكترون في كلّ حالة؟

65. قروي يدرس الفيزياء ويعتقد أنّه يستطيع إدخال عمود طوله 15.0-m مترا في حظيرة طولها 12.0-m مترا إذا ركض بسرعةٍ كافية (وهو يحمل العمود). فهل يستطيع فعل ذلك؟ فسّر بالتفصيل. كيف يتوافق هذا مع فكرة أنّ الحظيرة ستبدو أقصر من $12.0\,\mathrm{m}$ بالنسبة إليه وهو ينظر إليها راكضًا؟

66. إنّ الطاقة الناجمة عن تفاعل مولين من الهيدروجين ومول واحد من الأكسجين لتكوين مولين من الماء هي $484\,\mathrm{kJ}$. ما مقدار النقص في كتلتي العنصرين في هذا التفاعل؟ ما النسبة المئوية من كتلة النظام الأصلية الكلية التي يمثّلها التغيّر الكتلي هذا؟

67. استحدث جسمان متماثلان في تفاعل نووي، فتحركا في اتجاهين متعاكسين. إذا كانت سرعة كلّ جسيم $0.75c$ بالنسبة إلى إطار المختبر المرجعي، فما سرعة أحد الجسمين بالنسبة إلى الجسيم الآخر؟

68. قاس رائد فضاء في سفينة فضاء تسير بسرعة $0.75c$ بالنسبة إلى الأرض طول سفينته فوجدها $25\,\mathrm{m}$. وتناول طعامه في 23 دقيقة . (أ) ما طول سفينة الفضاء بالنسبة إلى مراقب على الأرض. (ب) ما الفترة الزمنية التي يستغرقها رائد الفضاء في تناول طعامه بالنسبة إلى مراقبين على الأرض؟

69. إذا انتقلت في سفينة فضاء بسرعة $0.85c$ مبتعدا عن الأرض. وأرسلت شعاعًا ليزريًّا باتجاه الأرض يسير بسرعة c بالنسبة إليك. ما سرعة شعاع الليزر كما يقيسها المراقبون على الأرض؟

70. الكتلة الكلية لسفينة فضاء وركابها هي $150{,}000\,\mathrm{kg}$. ويرغب الرّكاب أن يسافروا إلى نجم يبتعد 25 سنة ضوئية بسرعة $0.60c$. يقوم محرّك سفينة الفضاء بتحويل كتلة مباشرة إلى طاقة لكي تتسارع السفينة. ما مقدار الكتلة التي ستتحول إلى طاقة لتسريع سفينة الفضاء إلى هذه السرعة؟ افرض أنّ التسارع يتمّ بسرعة بحيث تكون السرعة للرحلة كاملة $0.60c$، وأهمل النقص في الكتلة الكلية لأغراض الحساب. كم ستستغرق الرحلة بالنسبة إلى رواد الفضاء في السفينة؟

71. افرض أنّ سفينة فضاء كتلتها 12,500-kg قد غادرت الأرض بسرعة $0.99c$. ما الطاقة الحركية لسفينة الفضاء؟ قارن هذا مع استهلاك الولايات المتحدة (US) السنوي للطاقة (حوالي $10^{20}\,\mathrm{J}$).

72. تنوي سفينة فضاء كتلتها 42,000-kg السفر إلى جوار نجم يبتعد 6.0 سنوات ضوئية عن الأرض. ويرغب ركّاب السفينة ألا تستغرق الرحلة (باتجاه واحد) أكثر من سنة واحدة. ما مقدار الشغل اللازم بذله على سفينة الفضاء لإيصالها السرعة الضرورية لهذه الرحلة؟

73. تهتز كتلة مقدارها 1.68-kg مثبتة بنهاية زنبرك ثابت صلابته $k = 48.7\,\mathrm{N/m}$. إذا كان هذا النظام مثبتا في سفينة فضاء تتحرك مبتعدة عن الأرض بسرعة $0.900c$، فما زمن تذبذب الكتلة الدوري حسب: (أ) مراقبين على السفينة؟ (ب) مراقبين على الأرض؟

74. يضمحل pi ميزون كتلته السكونية m_μ وهو ساكن إلى ميون (كتلته السكونية m_μ) ونيوترينو كتلته السكونية مهملة أو صفر. أثبت أنّ طاقة الميون الحركية هي $\mathrm{KE}_\mu = (m_\pi - m_\mu)^2c^2/2m_\pi$.

إجابات التمارين

أ: نعم.

ب : (أ) $2.21\,\mu s$. (ب) $5.0\,\mu s$.

جـ: (أ) لا.(ب) نعم.

د : $0.36c$.

هـ: لا.

و: $0.030c$ ، تماما مثل التقليدية، لدقة أفضل من 0.1%.



تنتج المجاهر الإلكترونيّة صورًا باستخدام الإلكترونات التي تمتلك خصائص موجية كالضّوء تمامًا. وبما أنّ الأطوال الموجيّة للإلكترونات يمكن أن تكون أصغر بكثير من نظيراتها للضّوء المرئيّ، فإنّ هذا يجعل الحصول على تحليل وتكبير أعلى بكثير أمرًا ممكنًا. ويمكن للماسح الإلكترونيّ دون المجهريّ أن ينتج صورًا ذات نوعيةٍ ثلاثية الأبعاد، كتلك الناتجة من الخلايا الغيارديه في أمعاء البشر الدقيقة التي يصل التكبير فيها إلى حوالي 2000 ضعف. وتبقى الغيارديا في ذهن الرّحالة (وغيرهم) لشيوعها في المياه غير المعالجة، وحتى في المياه التي على الجبال المرتفعة، وهي تسبّبُ التهابًا معويًّا مؤذيًا يصعب التّخلّص منه.

الفصل 27

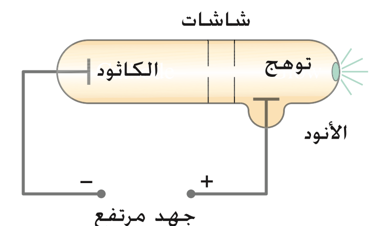
نظريّة الكمّ المبكرة والنماذج الذرّية

أكملت نظريّة الكمّ الجانب الآخر للتطوّر الذي هزّ عالم الفيزياء في بداية القرن العشرين، (بعد أن شكلت نظرية النسبية لآينشتاين التّطور الأوّل). وخلافًا لنظريّة النسبيّة الخاصّة، فإنّ تطوّر نظرية الكمّ تطلب ثلاثة عقودٍ تقريبا ليكتمل، إضافة إلى إسهامات كثيرمن العلماء في تطويرها. وبدأت نظرية الكمّ في عام 1900 مع فرضيّة الكمّ لبلانك، وتوّجت في منتصف عشرينيّات ذلك القرن بنظرية ميكانيكا الكم لشرودينغر وهايزنبيرغ، والتي كانت فاعلة للغاية في تفسير تركيب المادة. إنّ اكتشاف الإلكترون في تسعينيّات القرن التاسع عشر، والذي سنبدأ به هذا الفصل، يمكن أن يُقال بأنّه حدّد بداية الفيزياء الحديثة، وشكّل نوعًا من التبشير بنظريّة الكمّ.

1-27 اكتشاف الإلكترون وخصائصه

قرب نهاية القرن التاسع عشر، أجريت دراسات عديدة على التفريغ الكهربائي خلال الغازات النقية. وتكونت إحدى هذه الأدوات، كما هي مخططة في (الشكل 27 – 1)، من أنبوبٍ زجاجي وُضِعَ فيه إلكترودان (قطبان كهربائيّان) بعد أن تمّ تفريغه لتبقى كمية صغيرة جدّا من الغاز محصورة في داخله. وعندما طبّقَ فرق جهدٍ عالٍ جدًّا على قطبيه الكهربائيين، ظهر وكأنّ الفضاء المعتم قد امتد منه نحو الخارج مبتدئا من المهبط (الكاثود، القطب السالب) ومتجها إلى الجانب الآخر للأنبوب، ليتوهج عندئذٍ طرف الأنبوب البعيد. وعند وضع شبكة أو أكثر تحتوي كلّ منها على ثقب صغير، كما هو مبين، انحصر التوهج في نقطة صغيرة عند نهاية الأنبوب. وظهر وكأنّ هناك "شيئًا" قد انبعث بوساطة المهبط، وسار عبر الأنبوب باتّجاه طرفه الآخر. وسُمّيت هذه "الأشياء" **أشعّة المهبط**.

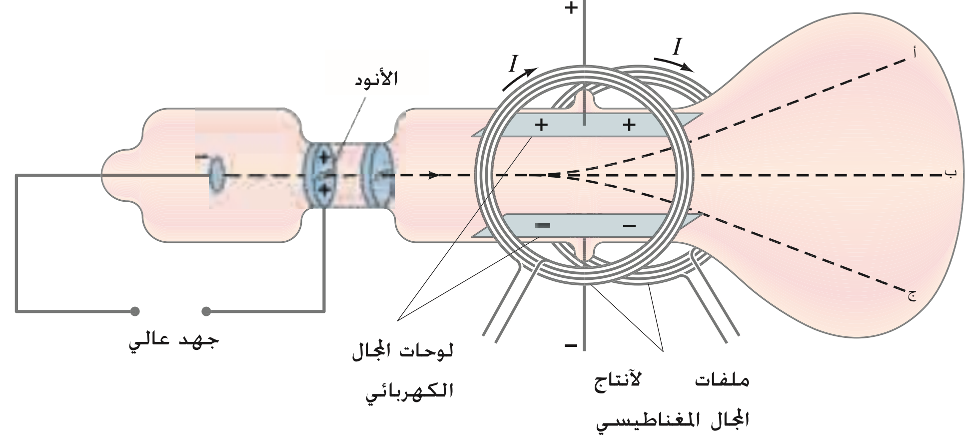
كان هناك كثيرٌ من الجدل في ذلك الوقت حول ماهيّة هذه الأشعة. وظنّ بعضُ العُلماء أنّ هذا قد يشبه الضّوء. ولكن ملاحظة إمكانية انحراف النقطة المضيئة عند نهاية الأنبوب إلى أحد الجوانب بوساطة



(الشكل 27 - 1) أنبوب تفريغ. في بعض النماذج، إحدى هذه الشبكات، هي الأنود (لوح موجب).

مجال كهربائي أو مغناطيسي دلّ على أنّ أشعة المهبط قد تكون جسيمات مشحونة. وكان اتجاه الانحراف متوافقًا مع خصائص شحنة سالبة. وإضافةً إلى ذلك، أمكن جعل مسار أشعة المهبط مرئيًّا بوساطة توهج بسيط كنتيجة لاحتواء الأنبوب على أنواع معينة من الغازات النقية.

وكان قد تمّ تقدير الشحنة e لجسيمات أشعة المهبط (المفترضة) هذه. إضافةً إلى نسبة الشحنة إلى الكتلة e/m بحلول عام 1897. ولكن في العام ذاته، استطاع جي جي ثومسون (1856 – 1940) أن يقيس e/m مباشرة، باستخدام الأداة المبينة في (الشكل 27 – 2). سُرّعت أشعة كاثود بوساطة فرق جهد مرتفع، وتركت لتمرّ من خلال زوجين من الألواح المتوازية المبنية داخل الأنبوب. وأنتج فرق الجهد المطبق بين اللوحين مجالا كهربائيًا، في حين أنتج زوجٌ من الملفات مجالا مغناطيسيًّا.



الشكل 27 – 2 انحراف أشعة الكاثود بوساطة المجالين الكهربائي والمغناطيسي.

وعند وجود المجال الكهربائي بمفرده، مع كون اللوح العلوي موجبًا، انحرفت أشعة المهبط نحو الأعلى كما هو في المسار "أ" في (الشكل 27 – 2). وإذا وُجِدَ المجال المغناطيسي منفردًا، ولنقل متجها صوب الداخل، فإنّ الأشعة تكون قد انحرفت تجاه الأسفل على امتداد المسار"د". وهذه الملاحظات متوقعة فقط من جسم مشحون بشحنة سالبة .

وقيمة القوة على الأشعة الناتجة من المجال المغناطيسي هي $F_{mag} = evB$، حيث e هي الشحنة، أمّا v فهي سرعة أشعة المهبط (المعادلة 20 – 4). وفي غياب المجال الكهربائي، تنحني الأشعة في مسار مائل. وبتطبيق قانون نيوتن الثاني $F = ma$ على شعاع كاثود يعطي:

$$evB = m\frac{v^2}{r}$$

ولذلك

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br}$$

ويمكن قياس كلّ من نصف قطر الانحناء r، والمجال المغناطيسي B، وإيجاد v عند تطبيق مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي. كما يمكن تعديل المجال الكهربائي E بحيث لا تنحرف أشعة المهبط، بل تتبع المسار "ب" في (الشكل 27 – 2). وفي هذه الحالة، فإنّ القوة (إلى أعلى) الناتجة من المجال الكهربائي، $F_{el} = eE$، ستتوازن مع القوة (إلى أسفل) الناتجة من المجال المغناطيسي
$F_{mag} = evB$. ونستطيع أن نساوي القوتين، $eE = evB$، لنجد

$$v = \frac{E}{B}$$

وعند دمج هذا مع المعادلة في الأعلى نحصل على

قياس e/m

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r} \qquad (1\text{-}27)$$

ويمكن قياس كميات الجانب الأيمن جميعها. فبالرغم من عدم إمكانية تحديد قيمة كلّ من e و m على انفراد، إلاّ أنّه يمكن تحديد نسبتهما e/m. إنّ القيمة المقبولة حاليًّا هي $e/m = 1.76 \times 10^{11}$ C/kg. وأصبحت أشعة المهبط تسمى **إلكترونات** بعد ذلك بفترة قصيرة.

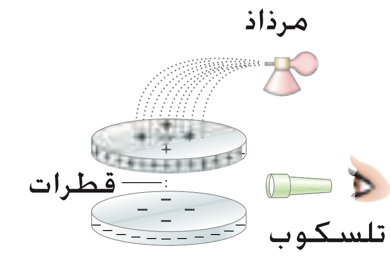
اكتشاف الإلكترون

إنّ"اكتشاف" الإلكترون، كالاكتشافات الأخرى الكثيرة في العلوم، لم يكن واضحًا كثيرًا مثل اكتشاف الذهب أو النفط. وكان التساؤل المُحيّر هو: هل يجب أن يُمنح التقدير بالاكتشاف للشخص الأوّل الذي رأى التّوهّج في الأنبوب؟ أم إلى الشخص الأوّل الذي أطلق تسمية أشعة المهبط؟ بل ربّما لا لهذا ولا لذاك؛ لأنّهما لم يصلا إلى فهم حقيقة الإلكترون كما نعرفها اليوم. وفي الحقيقة، إنّ تقدير الاكتشاف أعطي بشكل عام إلى ثومسون، ليس لأنه كان الأوّل في رؤية التّوهّج في الأنبوب.

بل لاعتقاده الراسخ بأنّ هذه الظاهرة ناجمة من جسيمات ضئيلة مشحونة بشحنة سالبة. ولإجرائه قياسات متأنية عليها. وعلاوة على ذلك. جداله بأنّ هذه الجسيمات ما هي إلا جزء من مكونات هذه الذرات. وليست كما يظنّ الكثيرون بأنّها أيونات أو ذرّات. وكذلك لقيامه بتطوير النظرية الإلكترونية للمادة. وكانت وجهة نظره قريبة لما يقبل به في هذه الآونة. ولهذا. نُسِبَ فضل "الاكتشاف" إلى ثومسون. ومع ذلك. تجدر الإشارة إلى أنّ لا ثومسون ولا أيّ أحدٍ آخر قد رأى يومًا الإلكترون ذاته. ونذكر هذا باختصار. لأنه تمثيلٌ عمليّ على حقيقة أنّ الاكتشافات العلمية لا تكون دائما واضحة. وفي الحقيقة. فإنّ بعض فلاسفة العلم يعتقدون أنّ كلمة "اكتشاف" هي غالبا كلمة غير مناسبة. كما في هذه الحالة.

اعتقد ثومسون أنّ الإلكترون ليس الذرة نفسها. ولكنه أحد مكوناتها. أو جزء منها. وجاء الدليل المقنع بعد ذلك بقليل بعد تحديد شحنة أشعة المهبط وكتلتها. وقام طالب ثومسون "تاونسند" بإجراء أوّل قياسات مباشرة (غير دقيقة) على الإلكترون عام 1897. ومع هذا. فقد كانت **تجربة قطرة الزيت** لروبرت ميليكان $(1868-1953)$ هي التي أفضت بقيمة دقيقة لشحنة الإلكترون. وأظهرت أنّ الشحنة تأتي بكميات (مكمية). وسُمِحَ. في هذه التجربة. لقطرات من زيت غير عضوي تحمل شحنة كهربائية بالسقوط تحت تأثير الجاذبية الأرضية بين لوحين متوازيين (الشكل $27-3$). وتمّ تعديل المجال الكهربائي E بين اللوحين إلى أن تعلقت قطرة الزيت في منتصف الهواء. وكان اتجاه تأثير الجاذبية على القطرة المعلقة في الهواء إلى الأسفل. فسحبت الجاذبية القطرة ذات الكتلة m_{dr} إلى الأسفل بمقدار $m_{dr}g$. وتمّت موازنة هذا السحب بقوة ناجمة من المجال الكهربائي إلى الأعلى. وكانت النتيجة أنّ $qE = m_{dr}g$ لتكون الشحنة q على القطرة $q = m_{dr}g/E$. وتمّ تحديد كتلة القطرة عن طريق قياس سرعتها الحدّيّة في غياب المجال الكهربائي. وفي الغالب. كانت القطرة تشحن بشحنة سالبة. ومع هذا. فقد كانت تشحن في بعض الأوقات بشحنة موجبة. مما يفسّر بأنّ القطرة كانت تكتسب إلكترونات أو تفقدها (بالاحتكاك. وهي تغادرالمرذاذ). وقدّم تحليل ميليكان وملاحظاته المضنية دليلا قاطعا على أنّ أيّ شحنة هي مضاعفات مكمية لأصغر شحنة e والتي نسبت إلى الإلكترون. وأنّ قيمة e هي 1.6×10^{-19} C. (وتعطى قيمة e. في أيامنا هذه. كما ذكِرت في الفصل السادس عشر: $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C. وقيمة e هذه بالإضافة إلى القيمة المقيسة e/m تعطي كتلة الإلكترون لتكون $(1.6 \times 10^{-19}\text{ C})/(1.76 \times 10^{11}\text{ C/kg}) = 9.1 \times 10^{-31}$ kg وهذه الكتلة هي أقل من $1/1000$ من كتلة أصغر ذرة. لتؤكد فكرة أنّ الإلكترون ما هو إلاّ جزء من الذرة. والقيمة المقبولة. في أيامنا هذه. لكتلة الإلكترون هي $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg أمّا النتائج العملية. فإنّ أيّ شحنة تبدو وكأنها مضاعفات مكمية لـ e تعني أنّ الشحنة الكهربائية مكمّية (تحدث في كميات محيحة فقط). كما ناقشنا في الفصل السادس عشر.

تجربة قطرة الزيت لميليكان

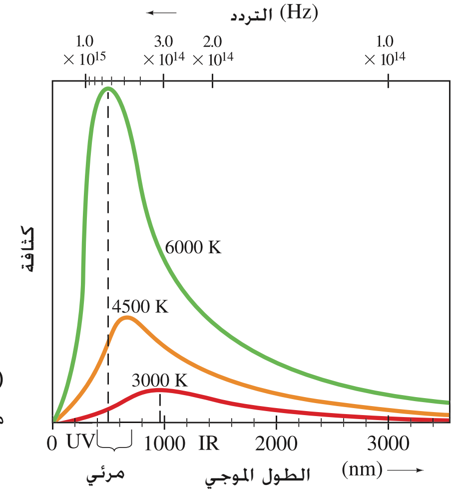


الشكل 27 – 3 تجربة قطرة الزيت لميليكان

2-27 فرضية بلانك الكمّيّة، وإشعاعات الجسم الأسود

إشعاعات الجسم الأسود

إحدى الملاحظات التي لم تفسّر مع نهاية القرن التاسع عشر كانت الطّيف الضّوئيّ المنبعث من الأجسام الساخنة. لقد رأينا في (البند 14 – 8) أنّ الأجسام جميعها تبعث إشعاعات تتناسب شدتها الكلية مع الأسّ الرّابع لدرجة الحرارة المطلقة بالكلفن (T^4). وعند درجات الحرارة الطبيعية $(\approx 300\text{ K})$. فإننا لا نشعر بالإشعاعات الكهرومغناطيسية هذه بسبب ضعف شدتها. أمّا عند درجات الحرارة المرتفعة. فهناك إشعاعات تحت حمراء كافية لكي نشعر بحرارة الأجسام القريبة منا. وعند درجات الحرارة الأعلى من ذلك (بالقرب من 1000 K). تتوهج الأجسام فعليّا. كحارقة الموقد الكهربائي الأحمر - الساخن أو كسلك التسخين في المحمصة. وعند درجات حرارة أعلى من 2000 K. فإنّ الأجسام تتوهج بلون أصفر أو مبيض. مثل الحديد - الأبيض الساخن وفتيلة المصباح الضّوئي. ومجال الضوء المنبعث مدى متصل من أطوال الأمواج أو الترددات. والطيف عبارة عن رسم بياني للشدة مقابل الطول الموجي أو التردد. وكلما ازدادت درجة الحرارة. فإنّ الإشعاعات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الأجسام لا تزداد شدتها الكلية فقط. بل تصبح أشد عند الترددات الأعلى والأكثر علوًّا.



(الشكل 27 - 4) أطياف مقيسة لأطوال أمواج وترددات منبعثة من جسم أسود عند ثلاث درجات حرارة.

يظهر (الشّكل 27 - 4) طيفًا ضوئيًّا منبعثًا من جسم أسود مثاليّ ساخن. إنّ **الجسم الأسود** هو الجسم الذي سيمتص الإشعاعات الساقطة عليه جميعها (ولذلك يظهر أسود تحت الانعكاس عند إضاءته من الخارج). والإشعاعات التي قد يصدرها الجسم الأسود عندما يكون ساخنًا ومضيئًا، والمسمّاة **إشعاعات الجسم الأسود** (بالرغم من عدم ضرورة أن تكون سوداء) هي الأسهل في التعامل، وهي الأقرب لتلك الناتجة من أجسام كثيرة حقيقية. ويبلغ منحنى الـ 6000-K المبين في (الشكل 27 –4)، المناظر لدرجة حرارة سطح الشمس–ـ ذروته في الجزء المرئي من الطيف. وعند درجات الحرارة المنخفضة، تنخفض الإشعاعات الكلية بشكل ملموس، وتحصل الذروة عند الأمواج الأطول (أو عند الترددات الأقلّ). لذا، فإنّ نهاية الطيف المرئي الزرقاء (وفوق البنفسجية) هي أضعف نسبيًّا من درجات الحرارة الأخفض. (وهذا سبب توهج الأجسام بلون أحمر عند حوالي 1000 K). وقد وُجدَ عمليًا أنّ الطول الموجي عند ذروة الطيف، λ_P مرتبط بدرجة الحرارة بالكلفن T بوساطة

إشعاع الجسم الأسود

$$\lambda_P T = 2.90 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K} \qquad \mathbf{(27-2)}$$

.ويُسمّى هذا **قانون واين**

المثال 27-1 درجة حرارة سطح الشّمس

قدّر درجة حرارة سطح شمسنا، إذا علمت أنّ الشمس تبعث ضوءًا تحدث ذروة شدته في الطيف المرئي عند حوالي 500 nm.

النّهج: نفترض أنّ الشّمس تتصرّف كجسم أسود، ونستخدم $\lambda_P = 500$ nm في قانون واين (المعادلة 27 – 2).

الحلّ: يعطي قانون واين

$$T = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}}{\lambda_P} = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}}{500 \times 10^{-9}\,\mathrm{m}} \approx 6000\,\mathrm{K}$$

المثال 27-2 لون نجم

افرض أنّ درجة حرارة سطح نجم 32,500 K. ما اللون الذي سيظهر عليه هذا النجم؟

النّهج: نفرض أنّ النجم سيبعث إشعاعات كجسم أسود ، ونحل لإيجاد λ_p من قانون واين (المعادلة 27 – 2).

الحلّ: لدينا من قانون واين

$$\lambda_P = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}}{T} = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}}{3.25 \times 10^{4}\,\mathrm{K}} = 89.2\,\mathrm{nm}$$

وعليه، فإنّ الذروة تكون في مدى الأشعة فوق البنفسجية UV من الطيف، وهي إلى أقصى اليسار في (الشكل 27 –4). وأمّا في المنطقة المرئية، فإنّ المنحنى سينحدر، بحيث تكون أقصر أطوال الأمواج هي الأقوى. ولذلك سيبدو النجم أزرق (أو أزرق - مبيضاً).

ملحوظة: يساعدنا هذا المثال على فهم السبب وراء ظهور النجوم بألوانٍ مختلفة (حمراء لأبرد النجوم، وأمّا لأكثرها "سخونة" ، فهي برتقالية، أو صفراء، أو بيضاء، أو زرقاء).

التمرين أ: ما لون جسم ما عند 4000 K؟

فرضيَّة بلانك الكمّيّة

فرضية بلانك الكمية

في العام 1900، اقترح ماكس بلانك (1858 – 1947) نظريّة كانت قادرةً على إعادة إنتاج منحنيات (الشكل 27 – 4). واعتمدت نظريته التي لا تزال مقبولة في أيامنا هذه على افتراض جديد وجذري، وهو أنّ طاقة اهتزازات الذرات داخل الجزيئات لا يمكنها أن تملك قيما عشوائية. وبدلا من ذلك فهي تملك مضاعفات قيمة دنيا ترتبط بتردد الاهتزاز بوساطة العلاقة

$$E = hf$$

وهنا h ثابت جديد، يُسمّى الآن **ثابت بلانك**. وقدّر بلانك قيمته عن طريق مواءمة صيغة منحنى إشعاع الجسم الأسود مع النتائج العملية. والقيمة المقبولة في أيامنا هذه هي

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

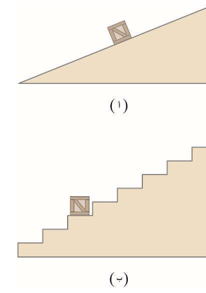
ويقترح افتراض بلانك أنّ طاقة أيّ اهتزاز جزيئي يمكن أن تكون فقط مضاعفات عدد صحيح من hf :

$$E = nhf, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(3-27)}$$

ويُسمّى n **العدد الكمي** (وتعني "الكم" "كمية منقطعة" ومعاكسة لـ "كمية متصلة") . وتُدعى هذه الفكرة في الغالب بـ **فرضية بلانك الكمية**، على الرغم من أنها لم تحظ باهتمام كافٍ في ذلك الوقت. وفي الحقيقة، فقد عدّها بلانك أداة رياضية للحصول على "الإجابة الصحيحة" أكثر من كونها اكتشافا مكافئًا لاكتشافات نيوتن تلك. واستمر بلانك نفسه بالبحث عن تفسير تقليدي لإدخال h. وأمّا التقدير باعتبار أنّ هذا كان ابتكارا مهما وثوريا لم يأت إلا لاحقا، وذلك بعد عام 1905 عندما ساهم آخرون في هذا المجال، وخاصة آينشتاين.

وتدّعي الفرضية الكمية (المعادلة 27 – 3) أنّ طاقة هزّاز ما، يمكن أن تكون $E = hf$، أو $2hf$ أو $3hf$، وهكذا دواليك، ولكن لا يمكن أن يكون هناك أيّ اهتزازات ذات طاقات بين تلك القيم. أي أنّ، الطاقة ليست كمية مستمرة كما كان الاعتقاد سائدًا لقرون خلت، بل هي **مكمية** ؛ أي أنّها توجد بكميات متقطعة فقط. وتدعى أقلّ كمية طاقة ممكنة (hf) **كم الطاقة**. وتذكر من الفصل الحادي عشر أنّ طاقة الاهتزاز تتناسب مع مربع الاتساع. ولذلك، وكطريقة أخرى للتعبير عن الفرضية الكمية، يقال إنه ليس كلّ اتساع اهتزازي ممكن. وترتبط القيم الممكنة للاتساع بالتردد f.

إنّ المقارنة البسيطة التالية قد تساعد على الإيضاح. يمكن أن تعزف على آلة وترية مثل الكمان أو القيثارة على مدى متصل من الذبذبات عن طريق نقل أصابعك على امتداد الوتر. وعلى الجانب الآخر، فإنّ كلا من النّاي أو البيانو "مكمّى" بمنطق أنّ ذبذبات (نغمات) معينة فقط يمكن أن تعزف. أو قارن طريقا منحدرا، من خلال وضع صندوق عليه عند أيّ ارتفاع، مع مجموعة متواصلة من الدرجات حيث يمكن للصندوق أن يمتلك كميات معينة مقطعة فقط من طاقة الوضع كما هو مبيّن في (الشكل 27 – 5).



الشكل 27 – 5 مقارنة الطريق المنحدر بالدرج. (أ) يمكن لصندوق على طريق منحدر أن يمتلك قيما متصلة من طاقة الوضع . (ب) ولكن على الدرج، يستطيع الصندوق أن يمتلك فقط قيما متقطعة (مكمية) من الطاقة.

27-3 نظرية الفوتون للضوء والأثر الكهروضوئيّ

قام آينشتاين في عام 1905، العام نفسه الذي قدَّم فيه نظرية النسبية الخاصة، بتقديم تطوير جريء للفكرة الكمية مقترحًا نظرية جديدة للضوء. وكان بلانك قد اقترح في عمله أنّ طاقة الجزيئات الاهتزازية لجسم مشع هي مكمية بقيمة $E = nhf$، حيث n عددٌ صحيحٌ، و f هي تردد الجزيء المهتز. وجادل آينشتاين بضرورة نقصان طاقة الجزيء الاهتزازية بمقدار hf (أو $2hf$ ، الخ) إلى عدد صحيح آخر مضروب في hf مثل $(n-1)hf$ كنتيجة لانبعاث الضوء من هذا الجزيء المهتز. فيما بعد، ومن أجل حفظ الطاقة، يجب أن ينبعث الضوء في رزم، أو كميات، طاقة كلّ منها

طاقة الفوتون

$$E = hf \qquad \textbf{(4 – 27)}$$

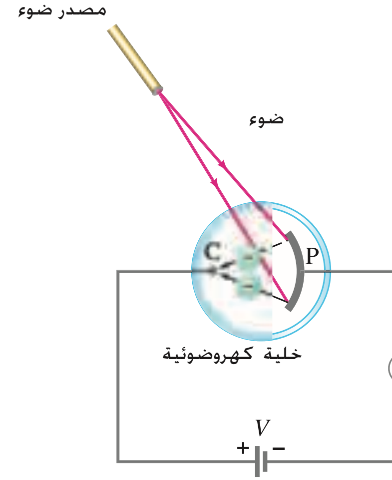
حيث يمثل f تردد الضوء المنبعث.

ومرةً أخرى h هو ثابت بلانك. وبما أنّ الضّوء كلّه في نهاية الأمر يأتي من مصدر مشع، فإنّ هذا يقترح أنّ الضوء ربما ينتقل كجسيمات صغيرة، أو **فوتونات**، كما تدعى الآن. بالإضافة إلى الأمواج التي تنبأت بها نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية. وكانت نظرية الفوتون الضوئية هي ايضا ابتعادا جريئا عن الأفكار التقليدية. واقترح آينشتاين اختبارًا لنظرية الضوء الكمية؛ قياسات كمية على الأثر الكهروضوئي.

الفوتونات

عندما يلمع الضوء على سطح فلزي، وُجِدَ أنّ الإلكترونات تنبعث من سطحه، وقد دُعيَ هذا **بالأثر الكهروضوئي**، ويحدث هذا في مواد عديدة، إلا أنه يسهل ملاحظته في الفلزات. ويمكن ملاحظته باستخدام الأداة المبينة في (الشكل 27 – 6). وُضع لوح فلزّيّ P ، وقطب كهربائي C أصغر داخل أنبوب زجاجي مفرغ، يُسمّى **خليّة ضوئيّة**. كما وُصِلَ القطبان الكهربائيّان إلى أميتر ومصدر emf كما هو مبين. وعندما تكون الخلية الضوئية في الظلام، يقرأ الأميتر صفرا. ولكن عندما يضيء مصدر ضوئي ذو ترددٍ عالٍ (بدرجة كافية) اللوح، يظهر الأميتر انسياب تيار في الدارة. ونفسّر اكتمال الدارة بتخيل أنّ الإلكترونات المخرجة بوساطة الإشعاعات الساقطة، قد انسابت عبر الأنبوب من اللوح إلى "المجمع" C كما هو مشار إليه في (الشكل 27 – 7).

الأثر الكهروضوئي



الشكل 27 – 6 الأثر الكهروضوئي

إنّ انبعاث الإلكترونات من الفلز بفعل الضوء يتوافق مع النظرية الكهرومغناطيسية (EM) الموجية للضوء: يمكن للمجال الكهربائي لموجة EM أن يُؤثر بقوة في الإلكترونات في الفلز فيُخرجُ بعضا منها. وعلى الرغم من ذلك، فقد أشار آينشتاين إلى أنّ النظرية الموجية ونظرية الفوتون الضوئية تعطيان تنبؤات مختلفة كثيرا عن تفاصيل الأثر الكهروضوئي. فعلى سبيل المثال، الطاقة الحركية العظمى (KE_{max}) للإلكترونات المنبعثة من الأشياء التي يمكن قياسها باستخدام الأداة في (الشكل 27 – 6). ويمكن إنجاز ذلك باستخدام مصدر فرق جهد متغير وعكس الأقطاب بحيث يصبح الإلكترود C سالبا و P موجبا. وستطرد الإلكترونات المنبعثة من P بوساطة الإلكترود السالب، ولكن لو كان فرق الجهد هذا صغيرا بدرجةٍ كافيةٍ، فلن تتوقف أسرع الإلكترونات عن الوصول إلى C، وسيكون هناك تيار في الدارة. وعند زيادة فرق الجهد العكسي، يتمّ الوصول إلى نقطة يصل التيار عندها إلى الصفر؛ لا توجد إلكترونات تملك طاقة حركية كافية للوصول إلى C. وتدعى هذه طاقة الإيقاف أو جهد الايقاف V_0، وعن طريق قياسها، يمكن تحديد KE_{max} باستخدام مبدأ حفظ الطاقة (المفقود من KE = المكتسب في PE) :

$$KE_{max} = eV_0$$

والآن، لنختبر تفاصيل الأثر الكهروضوئي من وجهة نظر النظرية الموجية مقابل نظرية آينشتاين الجسيمية.

بداية، النظرية الموجية، مفترضًا ضوءًا أحاديّ طول الموجة. إنّ أهمّ صفتين لموجة الضوء هما شدتها وترددها (أو طول موجتها). وعندما تتغير هاتان الكميتان، تتنبأ النظرية الموجية بما يلي :

تنبؤات النظرية الموجية

1. عند ازدياد شدة الضوء، يكون من الضروري ازدياد عدد الإلكترونات **المقذوفة**، وازدياد طاقتها الحركية العظمى؛ لأنّ الشدة العالية تعني اتساعا أكبر للمجال الكهربائي، وأنّ الإلكترونات المقذوفة بوساطة المجال الكهربائي الشديد ستكون ذات سرعات مرتفعة.
2. يجب ألا يؤثر تردد الضوء في الطاقة الحركية للإلكترونات **المقذوفة**. ويجب أن تؤثر الشدة فقط في KE_{max}.

أمّا النظرية الفوتونية فتقدم تنبؤات مختلفة تماما. ونلاحظ أولا أنّه في الشعاع أحادي طول الموجة، فإنّ الفوتونات جميعها تمتلك الطاقة نفسها $(= hf)$. وأنّ ازدياد شدة شعاع الضوء يعني زيادة في عدد فوتونات الشعاع، ولكن لن يؤثر هذا في طاقة كلّ فوتون مادام التردد لم يتغير. وحسب نظرية آينشتاين، فإنّ إلكترونا ما قد قذف من الفلز نتيجة التصادم مع فوتون واحد. وفي هذه العملية، تنتقل طاقة الفوتون جميعها إلى الإلكترون ويختفي الفوتون. وبما أنّ الإلكترونات محجوزة داخل الفلز بوساطة قوى الجذب، فهناك حاجة إلى طاقة دنيا ما W_0 لمساعدة الإلكترون على الخروج من السطح. وتدعى W_0 دالة الشغل (شغل الدالة)،وتتراوح قيمتها بعدد قليل من الإلكترون فولت $(1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J})$ لمعظم الفلزات. وإذا كان التردد f للضوء الساقط صغيرا جدًا لدرجة أنّ hf أقلّ من W_0 ، فعندها لن تمتلك الفوتونات طاقة كافية لقذف أيّ إلكترون نهائيًا. وإذا كانت $hf > W_0$ ، فإنّ عددا من الإلكترونات سيُقذف، وستحفظ الطاقة في العملية. أي أنّ الطاقة المدخلة (للفوتون)، hf ، ستساوي طاقة الإلكترون الحركية KE بالإضافة إلى الطاقة اللازمة لنقله خارج الفلز،W:

يصطدم فوتون واحد مع إلكترون وحيد فيخرجه.

$$hf = \text{KE} + W \qquad \text{(27 – 5أ)}$$

وستبعث أقلّ الإلكترونات ارتباطًا ممتلكة معظم الطاقة الحركية (KE_{max})، وفي هذه الحالة ستصبح W في هذه المعادلة دالة الشغل W_0، وتصبح KE عظمى KE_{max}:

$$hf = KE_{max} + W_0 \qquad \text{[أقلّ الإلكترونات ارتباطا]} \qquad \text{(27 - 5ب)}$$

وتتطلب إلكترونات عديدة طاقة أكثر من تلك الدنيا (W_0) للإفلات من الفلز. وعليه، فإنّ الطاقة الحركية لهذه الإلكترونات ستكون أقلّ من القيمة العظمى.

لذا، فإنّ النظرية الفوتونية تتنبأ بما يلي:

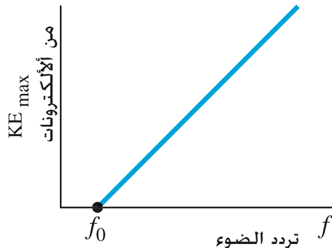
تنبؤات نظرية الفوتون

1. ازدياد شدة شعاع الضوء تعني سقوط فوتونات أكثر، وعليه، ستقذف إلكترونات أكثر. ولكن بما أنّ طاقة كلّ فوتون على حدة لن تتغير، فإنّ الطاقة الحركية العليا للإلكترونات لن تتغير بازدياد الشدة.
2. وإذا ازداد تردد الضوء، فإنّ الطاقة الحركية العليا للإلكترونات ستزداد طرديًّا، حسب(المعادلة 27 – 5 ب). أي أنّ

$$KE_{max} = hf - W_0$$

وتم رسم هذه العلاقة بيانيّا في (الشكل 27 – 7).

3. وإذا كان التردد f أقلّ من تردد القطع ، f_0 حيث $hf_0 = W_0$، فلن يُقذف أيّ إلكترون مهما كانت شدة الضوء كبيرة.



الشكل 27 – 7 الأثر الكهروضوئي: تزداد طاقة الإلكترونات الحركية العظمى المقذوفة طرديًا مع تردد الضّوء السّاقط. ولن تنبعث الإلكترونات إذا كان $f < f_0$.

ومن الواضح جدًّا أنّ تنبؤات نظرية الفوتون هذه مختلفة تماما عن تنبؤات النظرية الموجية. وفي 1913 – 1914، تمّ إجراء تجارب مصمّمة بدقة بوساطة ميليكان. وكانت النتائج على توافق تام مع نظرية الفوتون لآينشتاين.

لقد أكّدت إحدى سمات الأثر الكهروضوئي أيضًا نظرية الفوتون. إذا تمّ استخدام ضوء ذي شدة منخفضة للغاية، فإنّ النظرية الموجية تتنبأ بتأخير زمني قبل انبعاث أيّ إلكترون ليتمكن الإلكترون من استيعاب ما يكفي من الطاقة ليتجاوز دالة الشغل. ولا تتنبأ نظرية الفوتون بهذا التأخير – وهي تأخذ فوتونا واحدا *(إذا كان تردده عاليًا بما فيه الكفاية)* لتقذف إلكترونا –ولم تظهر التجارب أيّ تأخير كذلك. وهذا أيضًا أكّد نظريّة الفوتون لآينشتاين.

المثال 27-3 طاقة الفوتون

احسب طاقة فوتون ضوء أزرق، $\lambda = 450\,\text{nm}$ في الهواء (أو في الفراغ).

النّهج: يمتلك الفوتون طاقة $E = hf$ (المعادلة $27-4$) حيث $f = c/\lambda$ (المعادلة $22-4$).

الحلّ: بما أنّ $f = c/\lambda$ ، فلدينا

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(4.5 \times 10^{-7}\,\text{m})} = 4.4 \times 10^{-19}\,\text{J}$$

أو $(4.4 \times 10^{-19}\,\text{J})/(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}) = 2.8\,\text{eV}$. (انظر تعريف الإلكترون فولت في البند $17-4$ ، $1\,\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\,\text{J}$).

التمرين ب: يحتوي شعاع على ضوء تحت أحمر ذي طول موجي مفرد، $1000\,\text{nm}$، وعلى ضوء أحادي طول الموجة فوق بنفسجي عند $1000\,\text{nm}$، ولهما الشدة نفسها. فأيهما أكثر فوتونات: ذات 100-nm أم فوتونات ذات 100-nm؟

المثال 27-4 سرعة إلكترون ضوئي وطاقته

ما الطاقة الحركية وسرعة الإلكترون المنبعث من سطح الصوديوم (دالة شغله $W_0 = 2.28\,\text{eV}$) عندما يضاء بموجة طولها: (أ) $410\,\text{nm}$؟ (ب) $550\,\text{nm}$؟

النهج: نجد أولا طاقة الفوتونات ($E = hf = hc/\lambda$). إذا كانت الطاقة أكثر من W_0، فعندها ستقذف الإلكترونات بطاقات حركية KE ذات كميات متنوعة، وقيمة عظمى $\text{KE}_{\max} = hf - W_0$.

الحلّ: (أ) لأجل $\lambda = 410\,\text{nm}$

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = 4.85 \times 10^{-19}\,\text{J}$$

أو $3.03\,\text{eV}$

وتُعطى أعلى طاقة حركية يمكن لإلكترون أن يمتلكها وفق (المعادلة $27-5$ ب).

$\text{KE}_{\max} = 3.03\,\text{eV} - 2.28\,\text{eV} = 0.75\,\text{eV}$ أو $(0.75\,\text{eV})(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}) = 1.2 \times 10^{-19}\,\text{J}$

وبما أنّ $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ حيث $m = 9.1 \times 10^{-31}\,\text{kg}$.

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\text{KE}}{m}} = 5.1 \times 10^{5}\,\text{m/s}$$

وستمتلك معظم الإلكترونات المقذوفة KE أقلّ وسرعة أقلّ من القيم العظمى هذه.

(ب) عند $\lambda = 550\,\text{nm},\ hf = hc/\lambda = 3.61 \times 10^{-19}\,\text{J} = 2.26\,\text{eV}$ وبما أنّ طاقة الفوتون هذه هي أقلّ من دالة الشغل، فلن يقذف أيّ إلكترون.

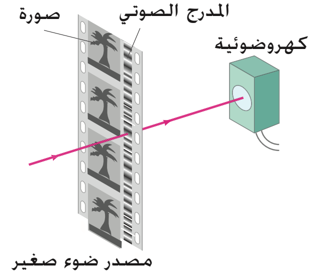
ملحوظة: لقد استخدمنا في (أ) معادلات غير نسبوية للطاقة الحركية. ولو كانت نتيجة v أكبر من $0.1c$ تقريبا، لكانت حساباتنا غير دقيقة بحوالي 1% أو أكثر، وربّما كان الأفضل حينها أن نعيد حساباتنا باستخدام الصيغة النسبوية (المعادلة $26-6$).

التمرين جـ: حدّد أقلّ تردّد، وأطول طول موجي لازم لانبعاث إلكترونات من الصوديوم.

من السهل إثبات أنّ طاقة الفوتون هي بالإلكترون فولت، وذلك عن طريق تحويل الوحدات (انظر المسألة 28) فقط، عندما يعطى الطول الموجي λ بالنانومتر:

$$E\,(\text{eV}) = \frac{1.240 \times 10^{3}\,\text{eV}\cdot\text{nm}}{\lambda\,(\text{nm})} \qquad \text{[طاقة الفوتون بـ eV]}$$

تطبيقات الأثر الكهروضوئيّ



الشكل 27 – 8 مسار صوت بصري على غشاء فيلم سينمائي. في جهاز الإسقاط، ضوء من مصدر صغير (يختلف عن مصدر ضوء الصورة) يمر خلال مسار الصوت على الغشاء المتحرك. وتغير المناطق المنيرة والمعتمة على امتداد مسار الصوت شدة الضوء النافذ الذي يصل الخلية الضوئية، والذي ينتج منه عندئذ نسخة من الصوت الأصلي. ومن ثمّ يضخم هذا الناتج ويرسل إلى السماعات. وتستطيع أجهزة الإسقاط عالية الجودة أن تعرض أفلاما تحتوي على عدة مسارات صوتية متوازية لتذهب إلى سماعات مختلفة حول المسرح.

إضافة للدور التاريخي المهمّ الذي يقوم به الأثر الكهروضوئي في تأكيد النظرية الفوتونية للضوء، فإنّ له تطبيقات عملية كثيرة؛ تستخدم أجهزة الإنذار ضدّ السّرقات، وفاتحات الأبواب الآلية غالبًا دارة خلية ضوئية كتلك المعروضة في (الشكل 27 – 6). فعندما يعترض شخصٌ ما شعاعا ضوئيًا، يُفعِّلُ الانخفاض المفاجيء في التيار الكهربائي مفتاحا– في غالب الأمر ملف لولبي- ويشغل هذا بدوره جرسًا أويفتح بابًا. ويُستخدم أحيانا ضوء UV أو IR في أجهزة الإنذار ضدّ السّرقات بسبب شفافيتها. وهناك الكثير من كواشف الدّخان تستخدم الأثر الكهروضوئي للكشف عن الكميات الصغيرة جدا من الدّخان التي قد تعترض انسياب الضوء، وبالتالي تغير من قيمة التيار الكهربائي. كما تستخدم أجهزة قياس التصوير الضوئي هذه الدارة أيضا. وتوظف الخلايا الضوئية في أجهزة أخرى كثيرة، كأجهزة قياس طيف الامتصاص الضوئي لقياس شدة الضوء. وأحد أنواع أغشية المسارات الصوتية هي الجزء الضيق المظلل والمتغير على جانب الغشاء . ولذلك، فإنّ الضوء المار خلال الغشاء يتم "تعديله". ليتبع الإشارة الكهربائية المخرجة من الخلية الضوئية الكاشفة الترددات على المسار الصوتي. انظر (الشكل 27 – 8). ولتطبيقات كثيرة في أيامنا هذه، فقد حلّ جهازٌ شبه موصل يُدعى الصمّام الثنائي الضوئي محلّ الخلية الضوئية المفرغة في (الشكل 27 – 6) (البند 29 – 8). وفي أشباه الموصلات هذه، فإنّ امتصاص أيّ فوتون يحرّر إلكترونًا من رابطته فتتغير موصلية المادة، ويتغير تبعًا لذلك التيار خلال الصمام الثنائي الضوئي.

27-4 طاقة الفوتون، وكتلته، وزخمه

لقد رأينا من (المعادلة 27 – 4) أنّ الطاقة الكلية لفوتون منفرد تعطى بـ $E = hf$. ولأنّ الفوتون ينتقل دائما بسرعة الضوء، فهو بالفعل جسيمٌ نسبويّ. ولذلك يجب أن نستخدم صيغا نسبوية عند التعامل مع كتلته، وطاقته، وزخمه . ويُعطى زخم أيّ جسيم كتلته السكونية m_0 بـ $p = m_0 v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ وبما أنّ $v = c$ لفوتون ما، فإنّ المقام في المعادلة السابقة يساوي صفرًا. ولتجنب الحصول على زخم لانهائي؛ فإننا نستنتج أنّ كتلة الفوتون السكونية يجب أن تكون صفرا: $m_0 = 0$. وهذا منطقي أيضا؛ لأنّ الفوتون لا يمكن أن يكون ساكنا (ويتحرك بسرعة الضوء). وطاقة الفوتون الحركية تعدّ ذاتها طاقته الكلية

$$\text{KE} = E = hf \qquad \text{[فوتون]}$$

ويمكن الحصول على زخم الفوتون من الصيغة النسبوية (المعادلة 26 – 10) $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ حيث وضعنا $m_0 = 0$. لذا، فإنّ $E^2 = p^2c^2$ أو

$$p = \frac{E}{c} \qquad \text{[فوتون]}$$

تنويه !

زخم الفوتون ليس mv

وبما أنّ $E = hf$ للفوتون، فإنّ زخمه يرتبط بطوله الموجي بالعلاقة

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad \textbf{(6- 27)}$$

المثال 27-5 قدر فوتونات من مصباح ضوئي

قدّر عدد فوتونات الضوء المرئي التي تنبعث من مصباح ضوئي قدرته 100-W. افرض أنّ كفاءة المصباح العادية هي 3% تقريبا (أي أنّ 97% من الطاقة تتحول إلى طاقة حرارية).

النّهج: دعنا نفترض متوسط طول موجي في منتصف الطيف المرئي، $\lambda \approx 500\,\text{nm}$. وطاقة كلّ فوتون $E = hf = hc/\lambda$. ينبعث فقط *3%* من القدرة 100-W كضوء، أو $3\,\text{W} = 3\,\text{J/s}$. عدد الفوتونات المنبعثة خلال ثانية يساوي الضوء الناتج من 3 J كلّ ثانية مقسوما على طاقة كلّ فوتون.

الحلّ: الطاقة المنبعثة في ثانية واحدة $(= 3\,\text{J})$ هي: $E = Nhf$، حيث N عدد الفوتونات المنبعثة لكلّ ثانية، و $f = c/\lambda$. ولذلك

$$N = \frac{E}{hf} = \frac{E\lambda}{hc} = \frac{(3\,\text{J})(500 \times 10^{-9}\,\text{m})}{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})} \approx 8 \times 10^{18}$$

لكل ثانية أو تقريبًا 10^{19} فوتون ينبعث كلّ ثانية، وهو رقمٌ هائل.

المثال 6-27 زخم الفوتون والقوة

افرض أنّ 10^{19} فوتون في الثانية قد انبعثت جميعها من مصباح ضوئي قدرته 100-W في (المثال $27-5$) وتم تركيزها على ورقة سوداء بحيث امتصت. (أ) احسب الزخم لفوتون واحد. (ب) قدّر القوة التي قد تؤثر بها هذه الفوتونات جميعها في الورقة.

النّهج: تمّ الحصول على زخم كلّ فوتون من (المعادلة $27-6$). $p = h/\lambda$. لاحقًا، كلّ زخم فوتوني ممتص يتحول من $p = h/\lambda$ إلى الصفر. ونستخدم قانون نيوتن الثاني، $F = \Delta p/\Delta t$. للحصول على القوة.

الحلّ: (أ) كلّ فوتون له زخم

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}}{500 \times 10^{-9}\,\mathrm{m}} = 1.3 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg\cdot m/s}$$

(ب) باستخدام قانون نيوتن الثاني لـ $N = 10^{19}$ فوتون (المثال $27-5$) والتي يتغير زخمها من h/λ إلى 0. نحصل على

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{Nh/\lambda - 0}{1\,\mathrm{s}} = N\frac{h}{\lambda} \approx (10^{19}\,\mathrm{s^{-1}})(10^{-27}\,\mathrm{kg\cdot m/s}) \approx 10^{-8}\,\mathrm{N}$$

وهذه قوة ضئيلة، ولكنّنا نستطيع أن نرى إمكانية تأثير مصدر ضوئي قوي جدًّا بقوة يمكن قياسها. ويمكن للقوة الناجّة من الفوتونات في الإشعاع الكهرومغناطيسي بالقرب من الشمس أو نجم ما، أن تكون هائلة.

المثال 7-27 التّركيب الضّوئيّ

تطبيق الفيزياء
التركيب الضوئي

في التركيب الضوئي، تستحوذ الصبغات كالكلوروفيل في النباتات على طاقة ضوء الشّمس لتحوّل CO_2 إلى كربوهايدرات مفيدة. حوالي تسعة فوتونات لازمة لتحويل جزيء CO_2 واحد إلى **كربوهايدرات** و O_2. مفترضا ضوءا ذا طول موجي $\lambda = 670\,\mathrm{nm}$ (يمتص الكلوروفيل بشدة خلال المدى 650 nm إلى 700 nm). ما كفاءة عملية التركيب الضوئي؟ التفاعل الكيميائي العكسي يطلق طاقة قدرها 4.9 eV/جزيء من CO_2.

النّهج: الكفاءة هي أقل طاقة لازمة (4.9 eV) مقسومة على الطاقة الممتصة الفعلية. تسعة أضعاف طاقة الفوتون الواحد (hf).

الحلّ: الطاقة لتسعة فوتونات، طاقة كلّ منها $hf = hc/\lambda$ هي
$(9)(6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s})(3.0 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s})/(6.7 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}) = 2.7 \times 10^{-18}\,\mathrm{J}$
أو 17 eV.
لذا، فإنّ كفاءة العملية هي $(4.9\,\mathrm{eV}/17\,\mathrm{eV}) = 29\%$

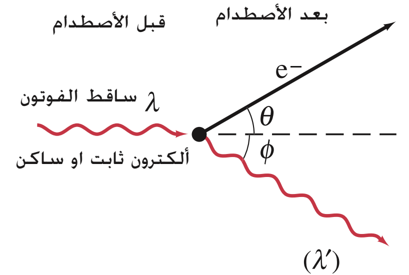
5-27 أثر كومبتون *

بالإضافة إلى الأثر الكهروضوئي، هناك عدة تجارب أجريت في بداية القرن العشرين دعمت نظرية الفوتون أيضا؛ واحدة منها هي **أثر كومبتون** (1923) التي سميت نسبة إلى مكتشفها، **كومبتون** (1892 – 1962). شتت كومبتون ضوءا ذا طول موجي قصير (أشعة إكس حقيقية) من مواد مختلفة. وقد وجد أنّ الطول الموجي للضوء المشتت أطول منه للضوء الساقط، ولذلك فله تردد أدنى قليلا، مما يدلّ على فقدان في الطاقة. وفسّر هذه النتيجة بناءً على النظرية الفوتونية كفوتونات ساقطة تصطدم مع إلكترونات المادة (الشكل $27-9$). وباستخدام (المعادلة $27-6$) لزخم الفوتون، طبّق كومبتون قانوني حفظ الزخم والطاقة على التصادم في (الشكل $27-9$)، واشتق المعادلة التالية للطول الموجي للفوتونات المشتتة:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\phi) \qquad (7\text{-}27)$$

حيث m_0 هي كتلة الإلكترون السكونية. (الكمية h/m_0c، والتي لها أبعاد طول، تدعى **طول موجة كومبتون** للإلكترون). ونرى أنّ الطول الموجي المتوقع للفوتونات المشتتة يعتمد على الزاوية ϕ التي قيست عندها. لقد كانت أقيسة كومبتون عام 1923 متطابقة مع هذه الصيغة. ولم تتنبأ نظرية الضوء الموجية بهذا الانزياح؛ فالموجة الكهرومغناطيسية EM القادمة بتردد f يجب أن تجعل الإلكترونات تهتز بتردد f، وهذه الإلكترونات المهتزة ستبعث أمواجا كهرومغناطيسية مرة أخرى تمتلك هذا التردّد f نفسه (البند $22-2$)، والتي لن تتغير بتغير الزاوية (ϕ). ونتيجة لذلك، فإنّ أثر كومبتون يضاف إلى الأساسات العملية المتينة لنظرية الفوتون الضوئية.

الشكل 27 – 9 أثر كومبتون. يصطدم فوتون مفرد (واحد) طوله الموجي λ بإلكترون مادة ما، فيخرجه من ذرته. ويمتلك الفوتون المشتت طاقة أقلّ (لأنّ جزءًا منها قد أعطي للإلكترون) ونتيجة ذلك فطوله الموجي أكبر، λ'. ووجدت التجارب أشعة إكس المشتتة بأطوال أمواج كما يتنبأ بها حفظ الطاقة والزخم باستخدام النموذج الفوتوني.



التمرين د: إذا شتت فوتونٌ إلكترونًا بوساطة أثر كومبتون، فأيّ من التالي سيزداد: طاقته، أم تردده، أم طوله؟

المثال 27-8 تبعثر أشعة إكس

تبعثرت أشعة إكس طولها الموجي 0.140 nm نانومترا عن شريحة رقيقة جدًا من الكربون. كم ستكون أطوال أمواج أشعة إكس المستطارة عند (أ) $0°$ ، (ب) $90°$ ، (جـ) $180°$ ؟

النّهج: هذا مثال على أثر كومبتون. ونستخدم (المعادلة $27-7$) لإيجاد أطوال الأمواج.

الحلّ: (أ) عند $\phi = 0°, \cos\phi = 1$ و $1 - \cos\phi = 0$. وعليه، تعطي (المعادلة $27-7$) : $\lambda' = \lambda = 0.140\text{ nm}$ وهذا منطقي لأنه عند $\phi = 0°$، ليس هناك حقيقة أيّ تصادم ليمرّ الفوتون خلال الشريحة دون أيّ تصادم يذكر.

(ب) عند $\phi = 90°, \cos\phi = 0$ و $1 - \cos\phi = 1$ وكذلك

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0c} = 0.140\text{ nm} + \frac{6.63\times10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}}{(9.11\times10^{-31}\text{ kg})(3.00\times10^{8}\text{ m/s})}$$
$$= 0.140\text{ nm} + 2.4\times10^{-12}\text{ m} = 0.142\text{ nm};$$

أي أنّ الطول الموجي أكبر بمقدار طول موجة كومبتون واحدة (0.0024 nm = نانومترا لإلكترون).

(جـ)عند $\phi = 180°$، ما يعني استطارة الفوتون إلى الخلف، وعودته إلى الاتجاه الذي جاء منه (تصادم "رأسي" مباشر)، $\cos\phi = -1$ و $1 - \cos\phi = 2$، لذلك

$$\lambda' = \lambda + 2\frac{h}{m_0c} = 0.140\text{ nm} + 2(0.0024\text{ nm}) = 0.145\text{ nm}.$$

ملحوظة : يحدث أكبر انزياح للطول الموجي عند الاستطارة العكسية (المرتدة)، وهو يساوي ضعفي طول موجة كومبتون.

تطبيق الفيزياء

قياس كثافة العظام

استخدم أثر كومبتون لتشخيص أمراض العظام مثل مرض لين العظام. أشعة جاماء هي فوتونات ذات أطوال موجية أقصر من تلك التي لأشعة إكس، والقادمة من مصدر مشع باستطارة عن مادة العظام. وتتناسب الشدة الكلية للأشعة المشتتة طرديًا مع كثافة الإلكترونات التي بدورها تتناسب مع كثافة العظام. وتشير التغييرات في كثافة العظام إلى بدء حدوث لين فيها.

27-6 تفاعلات الفوتون، وانتاج الثنائيّ

تفاعلات الفوتونات

عندما يمرّ فوتون خلال مادةٍ ما، يتفاعل مع ذراتها وإلكتروناتها. وهناك أربعة أنواع مهمّة من هذه التفاعلات التي من الممكن أن يخضع لها الفوتون هي:

1. الأثر الكهروضوئي: يمكن للفوتون أن يطرد إلكترونًا خارج ذرة ما ليختفي خلال العملية نفسها.

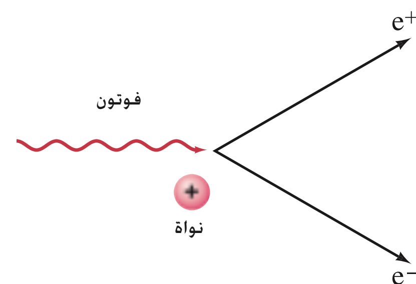
2. يمكن للفوتون أن ينقل إلكترونًا ذريًّا إلى حالة طاقة أعلى داخل الذرة إذا كانت طاقته غير كافية لطرد الإلكترون كليًا إلى الخارج. ويختفي الفوتون أيضًا في هذه العملية، ليمنح طاقته كلّها إلى الذرة . ويقال إنّ هذه الذرة في تلك الحالة في حالة مهيجة (مثارة) . وسنناقش هذه الحالة لاحقا بتفصيل أكبر.

3. يمكن للفوتون أن يستطارمن إلكترون (أو من نواة) ليخسرفي العملية بعض الطاقة، وهذا هو أثر كومبتون (البند $27-5$). ولكن لاحظ أنّ الفوتون لم يتباطأ. ولا يزال ينتقل بسرعة c، ولكن تردده سيكون أقلّ، لأنه فقد بعض الطاقة.

4. إنتاج الثنائي. يمكن للفوتون فعليًا أن يُكوّن مادة كإنتاج إلكترون وبوزيترون (الشكل $27-10$) . (للبوزيترون كتلة مماثلة لكتلة الإلكترون، ولكن مع شحنة معاكسة، $e+$).

وفي العملية 4، **إنتاج الثنائيّ** (تخليق)، يختفي الفوتون في عملية إنتاج (تخليق) الثنائي الإلكترون–بوزيترون. وهذا مثال على كتلة سكونية أنتجت من طاقة محضة، وهي تحدث طبقًا لمعادلة آينشتاين $E = mc^2$.

الشكل 27 – 10 انتاج الثنائي. يختفي فوتون لينتج إلكترونًا وبوزيترونًا.



لاحظ أنّ الفوتون لا يمكن أن ينتج إلكترونا فقط؛ لأنّ الشحنة الكهربائية عند ذلك لن تكون محفوظة. ويحدث عكس إنتاج الثنائي أيضا؛ فإذا اصطدم إلكترون مع بوزيترون، فإنهما **سَيفنيان** بعضهما بعضا وستظهر طاقتهما، وكذلك كتلتاهما، كطاقة كهرومغناطيسية للفوتونات. وبسبب هذه العملية، لا تعمّر البوزيترونات طويلا في الطبيعة.

يعدّ فناءُ الإلكترون – بوزيترون أو اضمحلاله الأساسَ لنوع من التصوير الطبي يعرف بـ PET كما تمّ مناقشته في (البند 31 – 8).

المثال 27-9 إنتاج (تخليق) الثنائيّ

(أ) ما أقل طاقة فوتون يمكن أن تنتج الثنائي الإلكترون –البوزيترون ؟ (ب) ما الطول الموجي لهذا الفوتون؟

أقلّ طاقة لإنتاج ثنائي e^+e^- هي 1.02 MeV

النّهج: أقل طاقة فوتون E تساوي الطاقة السكونية (m_0c^2) للجسيمين المنتجين بوساطة معادلة آينشتاين الشهيرة $E = m_0c^2$ (المعادلة 26 – 8). ولن يتبقى أيّ طاقة بعد ذلك. ولذلك، فإنّ الجسمين المنتجين سيمتلكان طاقة حركية تساوي صفرا. الطول الموجي $\lambda = c/f$ حيث $E = hf$ للفوتون الأصلي.

الحلّ: (أ) لأنّ $E = m_0c^2$. والكتلة المنتجة تساوي كتلتين سكونيتين للإلكترونين، فإنّ الفوتون يجب أن يمتلك طاقة

$$E = 2(9.11 \times 10^{-31}\,\text{kg})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})^2 = 1.64 \times 10^{-13}\,\text{J} = 1.02\,\text{MeV}$$

$(1\,\text{MeV} = 10^6\,\text{eV} = 1.60 \times 10^{-13}\,\text{J})$. وفوتون طاقته أقلّ من ذلك غير قادر على إنتاج ثنائي.

(ب) بما أنّ $E = hf = hc/\lambda$، فإنّ طول موجة 1.02-MeV فوتون هو

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(1.64 \times 10^{-13}\,\text{J})} = 1.2 \times 10^{-12}\,\text{m}$$

وهي 0.0012 nm. وهذه الفوتونات موجودة في منطقة أشعة جاما *(أو أشعة إكس قصيرة جدّا)* من الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل 22 – 8).

ملحوظة: تستطيع فوتونات ذات طاقة أعلى (أو أقصر طول موجي) أن تنتج ثنائيًا إلكترونيًا– بوزيترونيًا أيضًا، لتصبح الطاقة الزائدة طاقة حركية للجسيمات.

لا يمكن أن يحدث إنتاج ثنائيات في الفضاء الفارغ؛ لعدم إمكانية حفظ الزخم عندئذٍ. وعلى سبيل المثال، فإنّ الطاقة محفوظة في (المثال 27 – 9)، ومع هذا فقد كانت الطاقة المزودة كافية لإنتاج ثنائي إلكترون– بوزيترون ساكن(لا يملك زخما). لذا، فلن يتحرك الثنائي مبتعدا حاملا معه أيّا من زخم الفوتون الابتدائي . وبالطبع، يمكن إثبات (عند أيّ طاقة) وجوب مشاركة جسم إضافي هائل الكتلة، كنواة ذرة ما في التفاعل، ليستطيع الثنائي الناتج الابتعاد ومعه بعض الزّخم.

7-27 ازدواجية الموجة – الجسيم؛ ومبدأ التتام

إنّ الأثر الكهروضوئي، وأثر كومبتون، وتجارب أخرى قد وضعت النظرية الجسيمية للضوء على قاعدة تجريبية متينة. ولكن ماذا بشأن تجارب التداخل والحيود التقليدية لكلّ من "يونغ" وآخرين (الفصل 24) والتي أظهرت أنّ النظرية الموجية للضوء تستند هي أيضًا إلى قاعدة عملية متينة؟

ازدواجية الموجة – الجسيم

ونبدو هنا وكأننا في ورطة. تدلّ بعض التجارب على أنّ الضوء يتصرف كموجة، في حين تشير تجارب أخرى إلى تصرفه كسيل من الجسيمات. وتبدو هاتان النظريتان وكأنهما غير متوافقتين، ومع هذا فقد أظهرت كلّ منهما صحتها. وفي النهاية، توصّلَ الفيزيائيون إلى استنتاج مفاده قبول ازدواجية الضوء هذه كحقيقة حياة. ويشار إليها **بازدواجية الموجة - الجسيم**. وحسب الظاهر، فإنّ الضّوء ظاهرة أكثر تعقيدا من كونه مجرد موجة بسيطة أو شعاع بسيط من الجسيمات.



الشكل 27 – 11 "نيلز بور" (يمين)، يمشي مع "أنريكوفيرمي" على امتداد طريق "أبيان" خارج روما. وتظهر هذه الصورة إحدى الطرق المهمة التي صنعتها الفيزياء.

تنويه !
ليس من الصحة القول إنّ الضوء هو موجة و/ أو جسيم؛ لأنه قد يتصرف كموجة أو كجسيم.

لتوضيح هذه الحالة؛ اقترح العالم الفيزيائي الدانمركي النابغة "نيل بور" (1885 – 1962) . (الشكل 27 – 11) **مبدأ التتام** الشهير الذي ينصّ على أنه لكي يتم استيعاب تجربة ما. فإنّنا في بعض الأحيان نجد التفسير باستخدام النظرية الموجية. وأحيانًا أخرى نجده باستخدام النظرية الجسيمية. ومع هذا. فيجب أن نعي الوجهين الموجي والجسيمي للضوء إذا كنّا نسعى وراء فهم كامل للضوء. وعليه. فإنّ هذين الجانبين من الضوء يكمل بعضهما الآخر.

وليس من السهل "تخيل" هذه الازدواجية. ولا نستطيع بسهولة رؤية هذا الاتحاد بين الموجة والجسيم . وبدلا من ذلك. يجب أن ندرك أنّ ازدواجية الضوء هي "وجهان" يظهرهما الضوء للخبراء.

إنّ طريقة تفكيرنا تعدّ جزءا من صعوبة فهمنا؛ تعتمد الصور (أو النماذج) المرئية في أذهاننا على ما نشاهده في العالم اليومي. ونطبق المبدأين الموجي والجسيمي على الضوء؛ لأننا نرى في العالم الجاهري انتقال الطاقة من مكان إلى آخر بوساطة هاتين الطريقتين. وعلى الرغم من أننا نستطيع رؤية ما إذا كان الضوء موجة أم جسيما مباشرة. إلا أننا نقوم بعمل تجارب غير مباشرة. ولتفسير التجارب؛ نطبق نماذج الأمواج أو الجسيمات على طبيعة الضوء. ولكن ما هذه إلاّ أفكار تجريدية للعقل البشري . وعندما نحاول فهم حقيقية طبيعة الضوء. فإننا نصرّ على صورة مرئية (بصرية). ومع هذا فلا يوجد أيّ سبب يجعل الضوء مقيدا بهذين النموذجين (أو الصورتين المرئيتين) المأخوذين من العالم الجاهري . إنّ الطبيعة "الحقيقية" للضوء – إذا كان هذا يعني شيئا– من غير الممكن تخيلها. وأفضل ما يمكن عمله إدراك محدودية علمنا عن التجارب غير المباشرة. وبدلالة اللغة والصور اليومية. يكشف الضوء عن كلتا الصفتين: الموجية والجسيمية.

ومن الجدير بالملاحظة أنّ معادلة آينشتاين $E = hf$ ذاتها تربط كلا من الصفتين الجسيمية والموجية للشعاع الضوئي بعضهما ببعض. وفي هذه المعادلة. تشير E إلى طاقة الجسيم. وعلى الجانب الآخر من المعادلة. لدينا تردد الموجة المعنية f.

8-27 الطّبيعة الموجيّة للمادة

في عام 1923. وسّع لويس دي برولي (1892 – 1987) فكرة ازدواجية الموجة – الجسيم. وقدّر كثيرًا التماثل في الطبيعة. وقال: إذا تصرف الضوء في بعض الأوقات كالموجة وفي أوقات أخرى كالجسيم. فعندها ربا تمتلك تلك الأشياء الموجودة في الطبيعة والمعتقد أنها جسيمات – مثل الإلكترونات والأجسام المادية الأخرى – خصائص موجية. اقترح دي برولي أنّ الطول الموجي لجسيم مادّي قد يكون مرتبطا بزخمه بطريقة الفوتون نفسها (المعادلة 27 – 6). $p = h/\lambda$. أي أنه لجسيم زخمه الخطي $p = mv$. فإنّ طوله الموجي λ يعطى

طول موجة دي برولي

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (27 - 8)$$

وهذا صحيح تقليديًا ($p = m_0v$ لأجل $v \ll c$) ونسبويًا ($p = \gamma m_0 v = m_0 v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$). ويُدعى في بعض الأحيان **طول موجة دي برولي** للجسيم.

المثال 27-10 **الطّول الموجيّ لكرة**

احسب طول موجة دي برولي لكرة كتلتها 0.20-kg تتحرك بسرعة 15 m/s.

النّهج: نستخدم (المعادلة 27 – 8) ببساطة.

الحلّ:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s})}{(0.20\,\mathrm{kg})(15\,\mathrm{m/s})} = 2.2 \times 10^{-34}\,\mathrm{m}$$

الطول الموجي في (المثال 27 – 10) صغير لدرجة لا يمكن تصورها. وحتى لو كانت السرعة صغيرة إلى حدّ كبير. لنقل 10^{-4} m/s. فإنّ الطول الموجي سيكون حوالي 10^{-29} m. وبالفعل. فإنّ الطول الموجي لأيّ جسم عادي صغير جدّا لدرجة لا يمكن معها قياسه أو كشفه. والمشكلة أنّ خصائص الموجات كالتداخل والحيود. تكون ذات قيمة مهمة عندما تكون أحجام الجسيمات أو الشقوق ليست أكبر بكثير من الطول الموجي.

ولا توجد أيّ أجسام أو شقوق معروفة تعمل على انحراف موجات طولها 10^{-30} m فقط. لذلك، فإنّ الخصائص الموجية للأجسام العادية تبقى غير محسوسة. أمّا بالنسبة إلى الجسيمات الضئيلة، مثل الإلكترونات، فهي قضيّة أخرى. وبما أنّ الكتلة m تظهر في المقام في (المعادلة $27-8$)، فإنّ الكتلة الصغيرة جدّا يجب أن تمتلك طولا موجيا أكبر بكثير.

المثال 27-11 طول موجة إلكترون

حدّد طول موجة إلكترون تمّ تسريعه خلال فرق جهد 100 V.

النّهج: عندما تكون الطاقة الحركية أقلّ بكثير من الطاقة السكونية، يمكننا استخدام الطاقة الحركية التقليدية $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ (انظر نهاية البند $26-9$). لإلكترون ما، $m_0c^2 = 0.511$ MeV. ثمّ نطبق مبدأ حفظ الطاقة: KE المكتسبة بوساطة الإلكترون تساوي ما يخسره من PE. وبعد الحلّ لإيجاد v، نستخدم (المعادلة $27-8$) لإيجاد طول موجة دي برولي.

الحلّ: الطاقة الحركية المكتسبة تعادل الخسارة في طاقة الوضع: $\text{KE} = eV$ ($\Delta\text{PE} = eV - 0$)، ولذلك $\text{KE} = 100\text{ eV}$. النسبة $\text{KE}/m_0c^2 = 100\text{ eV}/(0.511\times10^6\text{ eV}) \approx 10^{-4}$، لذا فإنّ النسبيّة غير ضرورية: وعليه

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

و

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(1.6\times10^{-19}\text{ C})(100\text{ V})}{(9.1\times10^{-31}\text{ kg})}} = 5.9\times10^6\text{ m/s}$$

ولذلك

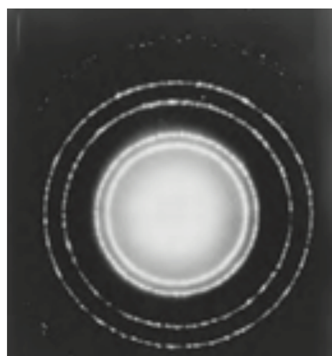
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.63\times10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s})}{(9.1\times10^{-31}\text{ kg})(5.9\times10^6\text{ m/s})} = 1.2\times10^{-10}\text{ m}$$

أو 0.12 nm.

التمرين هـ : عندما ينتقل جسمٌ ما بسرعة أكبر، هل يتناقص طول موجة دي برولي؟ أم يزداد؟ أم يبقى كما هو؟

من (المثال $27-11$)، نستطيع أن نرى إمكانية امتلاك الإلكترونات أطوال أمواج برتبة 10^{-10} m، وحتى أصغر من ذلك. وبالرغم من صغرها، إلا أنّه يمكن قياسها؛ المسافات بين الذرات في البلورة هي برتبة 10^{-10} m، ويمكن استخدام صفوف الذرات المرتبة في البلورة كنوع من محززات الحيود، كما تم عمله سابقا لأشعة إكس (انظر البند $25-11$). وقام كلّ من ديفيسون وجيرمر بإجراء تجربة حاسمة، حيث أجريا تجربة استطارة للإلكترونات عن سطح بلورة فلزية. وفي بداية 1927، لاحظا أنّ الإلكترونات قد تبعثرت على نمط قمم منتظمة. وعندما فسّرا هذه القمم كنمط حيودي، وجدا أنّ طول موجة الإلكترون الحائدة هي كما تنبأ بها دي برولي تماما (المعادلة $27-8$). وفي العام نفسه، استخدم ثومسون (الابن) ترتيبا عمليّا مختلفا، وقاس أيضا حيود الإلكترونات. انظر (الشكل $27-12$)، وقارنه بحيود أشعة إكس (البند $25-11$). وقد أظهرت التجارب لاحقا أنّ الإلكترونات، والنيوترونات، وجسيماتٍ أخرى لها خصائص موجية أيضا. لذا، فإنّ ازدواجية الموجة–الجسيم تنطبق على كلّ من الأجسام المادية والضوء. كما أنّ مبدأ التتام أيضاً ينطبق على المادة. أي أننا يجب أن نعي كلا الجانبين الجسيمي والموجي لنصل إلى فهم المادة، بما فيها الإلكترونات. ولكن يجب أن ندرك مرة أخرى أنّ الصورة المرئية "للموجة – الجسيم" غير ممكنة.

الشكل 27 – 12 نمط حيود إلكترونات مستطارة من رقيقة ألمنيوم، كما سجلت على غشاء.



ازدواجية الموجة – الجسيم ومبدأ التتام تنطبق على كلّ من المادة والضوء.

ما هو الإلكترون؟

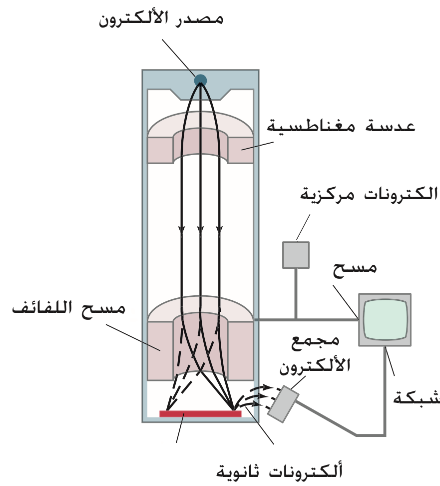
لقد بينت تجارب ثومسون الأولى (البند 27 – 1) توهّجا في الأنبوب. ليتحرك هذا التّوهّج عند تطبيق مجال مغناطيسي. وكان أفضل تفسير لنتائج هذه التجارب وغيرها على أنها كانت ناجمة من جسيمات صغيرة جدّا مشحونة بشحنة سالبة ندعوها الآن الإلكترونات. ومع هذا، فلم يَرَ أيّ أحدٍ هذه الإلكترونات مباشرة. والأشكال التي نرسمها أحيانا للإلكترونات ككرات صغيرة ذات شحنات سالبة هي لتسهيل التعامل معها (ثبت حاليا أنها غير صحيحة). ومرة أخرى يجب أن نعتمد على النتائج العملية التي يمكن تفسير بعضها على أحسن وجه باستخدام النموذج الجسيمي، في حين تفسّر حالات أخرى باستخدام النموذج الموجي. وهذه النماذج هي مجرد صور نستخدمها لنتمكن من الانتقال من العالم الجاهري إلى العالم دون المجهري الصغير للذرة. ولا يوجد أيّ سبب يجعلنا نتوقع أنّ هذه النماذج ستعكس حقيقة الإلكترون ولو بصورة ما. ولذلك، نستخدم نموذجًا موجيًا أو جسيميًّا (أيّهما يفيد أفضل في حينه) لكي نستطيع أن نتكلم عما يحدث. ولكن لا ينبغي أن ننقاد إلى الاعتقاد بأنّ الإلكترون هو موجة أو جسيم. وبدلا من ذلك نستطيع القول بأنّ الإلكترون مجموعة من خصائصه التي نستطيع قياسها. وقالها بشكل جيد "بيرتراند روسيل" عندما كتب أنّ الإلكترون "بناءٌ منطقيّ".

* 27-9 المجاهر الإلكترونية

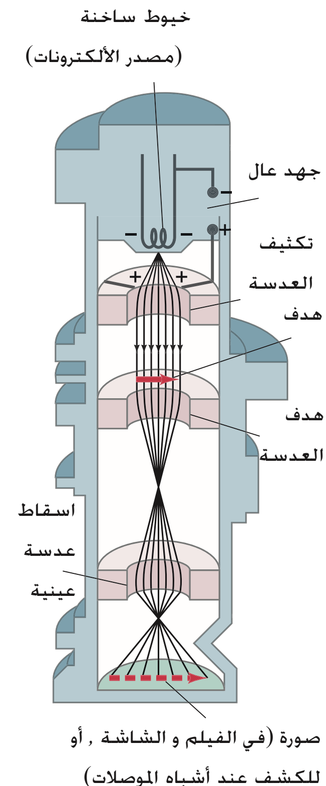
لقد أفضت فكرة أنّ الإلكترونات لها خصائص موجية إلى تطوير **المجهر الإلكترونيّ** الذي يستطيع إنتاج صورٍ ذات تكبير أكبر بكثير من تلك الناجمة عن المجهر الضوئي.

تطبيق الفيزياء
المجهر الإلكتروني

(الشكلان 27 – 13 و 27 – 14) هما رسمان من نوعين مختلفين، والمطوران عند منتصف القرن العشرين: **النافذ الإلكتروني دون المجهري** (TEM) الذي ينتج صورا في بعدين، و **الماسح الإلكتروني دون المجهري** (SEM) الذي ينتج صورا ذات نوعية ثلاثية- الأبعاد. وفي النوعين، فإنّ العدستين الشيئية والعينية هما فعليًا مجالان مغناطيسيان يُؤثران بقوى في الإلكترونات لجلبها إلى بؤرة ما. وتنتج المجالات بوساطة ملفات سلكية تحمل تيارات صُمّمت بعناية. وتظهَرُ الرسوم الصّورية باستخدام كلا النوعين في (الشكل 27 – 15).

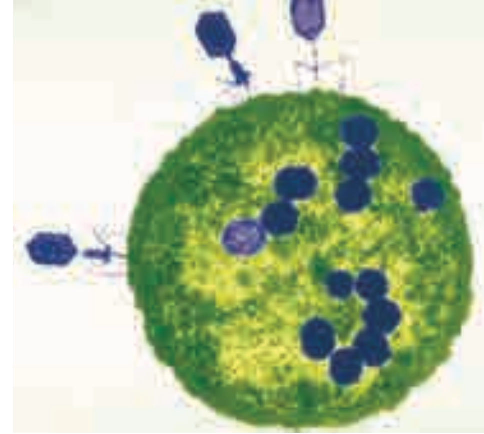


(الشكل 27-14) الماسح الإلكتروني دون المجهري. تحرك ملفاتُ الماسح شُعاعا إلكترونيّا إلى الأمام والخلف على امتداد العينة. ويتم تجميع الإلكترونات الثانوية الناجمة عن اصطدام الشعاع بالعينة، وتعدل شدة الشعاع في CRT لإنتاج صورة ما.

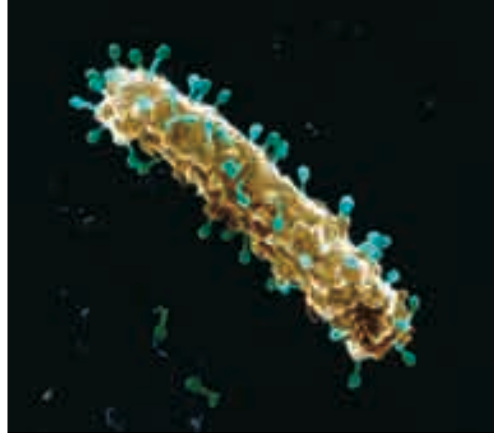


الشكل 27 – 13 النافذ الإلكتروني دون المجهري. صُمّمت ملفات المجال المغناطيسي لتكون "عدسات مغناطيسية"، وهي تحني المسارات الإلكترونية وتجلبها إلى بؤرة ما، كما هو مبين.

وكما نوقش في (البندين 25 – 7 و 25 – 8). فإنّ أكبرتحليل لتفاصيل جسم ما تقترب من طول موجة الإشعاعات المستخدمة لرؤيته. الإلكترونات المسرّعة بفروق جهد من مرتبة 10^5 V تمتلك أطوال أمواج رتبتها 0.004 nm. وأعلى تحليل يمكن الحصول عليه سيكون عند هذه الرتبة، ولكن عمليًّا، نجد أنّ الانحرافات في العدسات المغناطيسية تحدّ من القدرة التحليلية في المجاهر الإلكترونية النفاذية من 0.1 إلى 0.5 nm تقريبا في أفضل الحالات. ومع ذلك، فلا يزال هذا يشكل 10^3 ضعفا أدقّ من تلك التي يمكن الحصول عليها بوساطة مجهر الضوء المرئي، ويتوافق مع تكبير مفيد يقارب المليون، إلّا أنّ مثل هذا التكبير يصعب الحصول عليه. أمّا التكبير المتعارف عليه فيبلغ 10^4 إلى 10^5. وأعلى قدرة تحليلية يمكن الحصول عليها باستخدام ماسح إلكتروني دون مجهري هي أقلّ من ذلك، وهي عادةً من 5 إلى 10 nm بالرغم من كون القدرة التحليلية للماسحات الإلكترونية دون المجهرية الحديثة عالية الوضوح والتي تصل إلى 1 nm.



(أ)



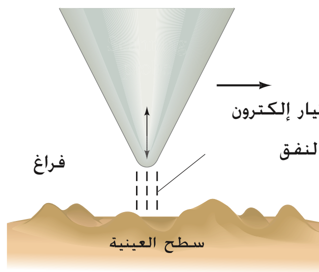
(ب)

الشكل 27 – 15 رسم إلكتروني دون مجهري (بألوان غير حقيقية) لفيروسات تهاجم خلية بكتيرية "ايشيريشيا كولي" : (أ) رسمُ نافذٍ إلكترونيّ دونَ مِجْهَرِيّ ($\approx 50{,}000\times$). (ب) رسمُ ماسح إلكترونيّ دونَ مِجْهَرِيّ ($\approx 35{,}000\times$).

يحتوي **الماسح النفقيّ الإلكترونيّ دون المجهريّ** (STM) المطوّرُ في ثمانينيّات القرن العشرين (1980s) على مجسّ صغير، يكاد يصل عرض رأسه إلى ذرتين أو ثلاث ذرات. ويُحَرك على امتداد العينة المراد فحصها في سلسلة من المسارات الخطية، كتلك التي يقوم بها شعاع إلكتروني في أنبوب تلفاز ما CRT، البند 17 – 10). يبقى رأس المجس خلال مسح العينة قريبا جدّا من سطحها، فيبتعد تقريبا مسافة نانومتر واحد أعلاها (الشكل 27 – 16). ويسبب تطبيق فولتية صغيرة بين المجس والسطح مغادرة الإلكترونات للسطح ومرورها خلال الفراغ إلى المجس، بوساطة عملية تعرف بـ النفقية(اجتياز النفق) (نوقشت في البند 30 – 12). وهذا التيار "النفقي" حسّاسٌ جدّا لمقدار عرض الفجوة. وعليه، فإنّ آلية للتغذية الراجعة يمكن استخدامها لرفع المجس وخفضه للحفاظ على تيار إلكتروني ثابت . ترسم حركة المجس الرأسية المتبعة لسطح العينة عندئذٍ كدالة في الموضع، لتنتج صورة ثلاثية الأبعاد للسطح. و يمكن تحليل معالم السطح الدقيقة كحجم الذرة بقدرة تحليلية أفضل من 0.1 nm أفقيّا، و 0.01 nm أو أفضل رأسيّا. وأعطى هذا النوع من التحليل إثارة هائلة لدراسة بنيان سطوح المواد. والصورة "الطبوغرافية" للسطح تمثل فعليّا توزيع الشحنة الإلكترونية.

إنّ **مجهر القوة الذريّ** (AFM) الذي طوّرَ في ثمانينيّات القرن العشرين (1980s) يعدّ بطرق كثيرة مشابها لجهاز STM، ولكن يمكن استخدامه على عينات المواد بنطاق أوسع من سابقه. وبدلا من قياس تيار كهربائي، فإنّ جهاز مجهر القوة AFM، يقيس القوة بين رأس الذراع الداعمة والعينة، أي القوة التي تعتمد بشدة على المسافة الفاصلة بين رأس الذراع والعينة عند كلّ نقطة. ويتحرك الرأس كما في جهاز STM.

تطبيق الفيزياء
AFM و STM



الشكل 27 – 16 رأس مجس الماسح النفقي الإلكتروني دون المجهري يتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل ليحافظ على تيار نفقي ثابت. رسم حركة المجس تنتج صورة للسطح.

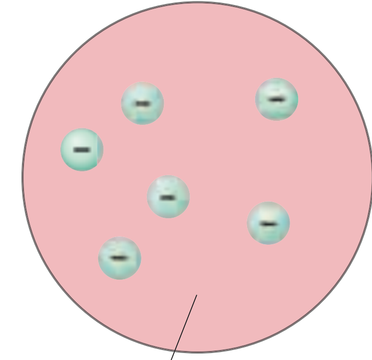
10-27 النماذج المبكرة للذرة

بحلول عام 1900، قبل معظم العلماء فكرة أنّ المادة مكونة من ذرات. ومع اكتشاف الإلكترون في تسعينيّات القرن التاسع عشر (1890s)، بدأ العلماء بالتفكير بأنّ الذرة نفسها تمتلك بنيانا مع كون الإلكترونات جزءا من هذا التركيب أو البنيان. ونقدّم الآن نهجنا الحديث للذرة والنظرية الكمية التي ترتبط بها.*

*يمكن أن يقول بعض القراء: "أخبرنا بالحقائق كما نعرفها اليوم، ولا تزعجنا بخلفيتها التاريخية ونظرياتها البائدة". إنّ هذا النهج يهمل الناحية الإبداعية للعلم، ويعطي انطباعا غير صحيح عن كيفية تطور العلوم. إضافة إلى ذلك، فمن غير الممكن حقيقة استيعاب وجهة النظر الحالية للذرة دون الاطلاع على المبادىء التي أفضت إليها.

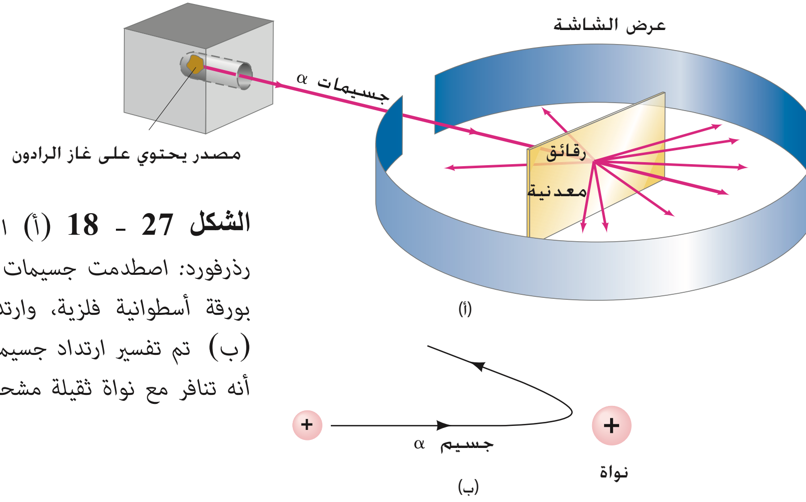
لقد تخيّل النموذج النمطي للذرة خلال تسعينيّات القرن التاسع عشر ($1890s$) على أنّها كرةٌ متجانسة موجبة الشحنة تحتوي في داخلها على إلكترونات صغيرة جدًّا ذات شحنات سالبة. تشبه حبات الخوخ في حلوى هلامية نوعا ما. (الشكل 27 – 17).

في حوالي العام 1911، أجرى إرنست رذرفورد (1871 – 1937) وزملاؤه، تجاربا تعارض نتائجها نموذج حلوى الخوخ الهلامية للذرة. وفي هذه التجارب شعاع من "جسيمات" ألفا(α)" المشحونة بشحنات موجبة تمّ توجيهها على ورقة أسطوانية الشكل رقيقة مصنوعة من مادة فلزية كالذهب (الشكل 27 – 18 أ). (جسيمات α هذه المكتشفة حديثا انبعثت من مواد مشعة، وقد تبين لاحقا أنها ذرات هيليوم ثنائية التأيّن – أي أنها تملك شحنة $+2e$). وكان متوقعا وفقا لنموذج الخوخ – الحلوى الهلامية ألا تنحرف أيّ من جسيمات ألفا بدرجة كبيرة، لأنّ الإلكترونات أخف بكثير من جسيمات ألفا، ولأنّ جسيمات ألفا ليس من المفروض أن تواجه تركيزًا هائلًا من الشحنات الموجبة لتتنافر معها بشدة. وتعارضت النتائج العملية تمامًا مع هذه التوقعات. وقد وُجِدَ أنّ معظم جسيمات ألفا قد مرّت من الورقة الأسطوانية الرقيقة دون أن تتأثر، كما لو أنّ الورقة في معظمها كانت فراغا. وانحرف عددٌ صغيرٌ من تلك الجسيمات بزوايا كبيرة جدًّا، لدرجة أنّ بعضها قد ارتد نحو الخلف، ويكاد يعود من الاتجاه الذي قدم منه. ويمكن لهذا أن يحدث فقط، كما علل رذرفورد، إذا تنافرت جسيمات ألفا المشحونة بشحنات موجبة مع شحنة موجبة هائلة مركزة في منطقة صغيرة في الفضاء (انظر الشكل 27 – 18 ب). وافترض أنّ الذرة يجب



الشكل 27 – 17 نموذج حلوى الخوخ الهلامية للذرة.

نموذج رذرفورد الكواكبي

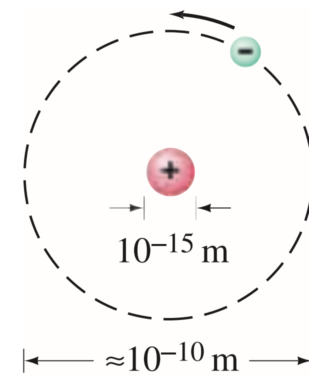


الشكل 27 - 18 (أ) الترتيب العملي لتجربة رذرفورد: اصطدمت جسيمات α المشعة من الرادون بورقة أسطوانية فلزية، وارتد بعضها نحو الخلف. (ب) تم تفسير ارتداد جسيمات α نحو الخلف على أنه تنافر مع نواة ثقيلة مشحونة بشحنة موجبة.

أن تتكون من نواة صغيرة جدًّا، ولكنها ثقيلة ومشحونة بشحنة موجبة، وتحتوي على أكثر من 99.9% من كتلة الذرة، ومحاطة بإلكترونات بعيدة عنها مسافة ما. وتدور الإلكترونات في أفلاك حول النواة – في صورة مماثلة لدوران الكواكب حول الشمس – لأنها لو كانت ساكنة، لسقطت باتجاه النواة بسبب التجاذب الكهربائي (الشّكل 27 – 19). واقترحت تجارب رذرفورد أنّ نصف قطر النواة يتراوح بين 10^{-15} إلى 10^{-14} m. ومن النظرية الحركية، وخصوصًا تحليل آينشتاين للحركة البراونية (انظر البند 13 – 1)، فقد تمّ تقدير نصف قطر الذرة على أنه حوالي 10^{-10} m. ولذلك، فإنّ الإلكترونات تبدو وكأنها على بعد 10,000 إلى 100,000 ضعف نصف قطر النواة نفسها. ولو كانت النواة بحجم كرة القاعدة(البيسبول)، فستمتلك عندئذ الذرة قطر مدينة كبيرة تمتد إلى عدة كيلو مترات). ولذلك تتكون الذرة في معظمها من الفراغ.

إنّ نموذج رذرفورد "الكواكبي" للذرة (المُسَمّى أيضًا "النموذج النووي للذرة") كان خطوة رئيسة باتجاه الطريقة التي ننظر بها للذرة في هذه الأيام. ومع هذا، فلم يكن نموذجا متكاملا، حيث اكتنفته بعض المشاكل الرئيسة، كما سنرى.

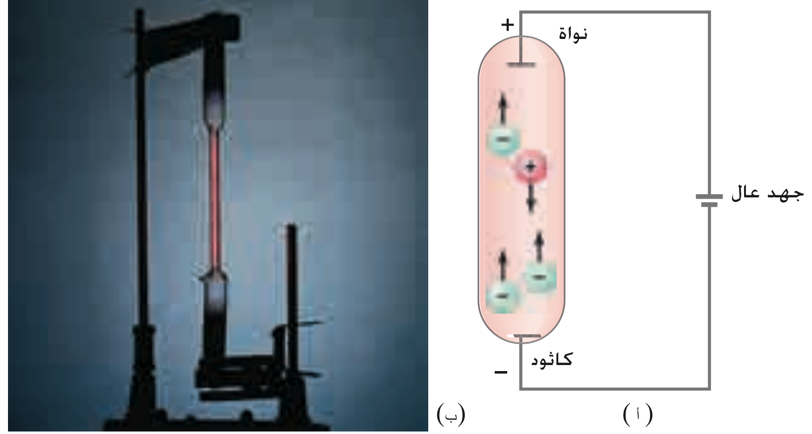
الشكل 27 - 19 نموذج رذرفورد للذرة، وبدلالته تدور الإلكترونات حول نواة موجبة صغيرة جدا (المقياس غير دقيق).ويتم تخيل الذرة على أنها تتكون (في معظمها) من الفراغ.



11-27 الأطياف الذّريّة، المفتاح إلى تركيب الذرة

في بداية هذا الفصل. رأينا أنّ المواد الصلبة المسخنة (بالإضافة إلى السوائل والغازات الكثيفة) تشع طيفًا مستمرًّا من أطوال الأمواج. وتمّ افتراض أنّ هذه الإشعاعات ناجمة من اهتزازات الذرات والجزيئات التي تخضع بدرجة كبيرة لتفاعل كلّ ذرة أو جزيء مع جيرانها / جيرانه.

يمكن أن تثار الغازات النادرة أيضًا لتشع ضوءًا. ويتمّ هذا بالتسخين الشديد. أو بشكل أعمّ بتطبيق فولتية عالية على "أنبوب تفريغ" يحتوي على الغاز عند ضغط منخفض (الشكل 27 – 20).

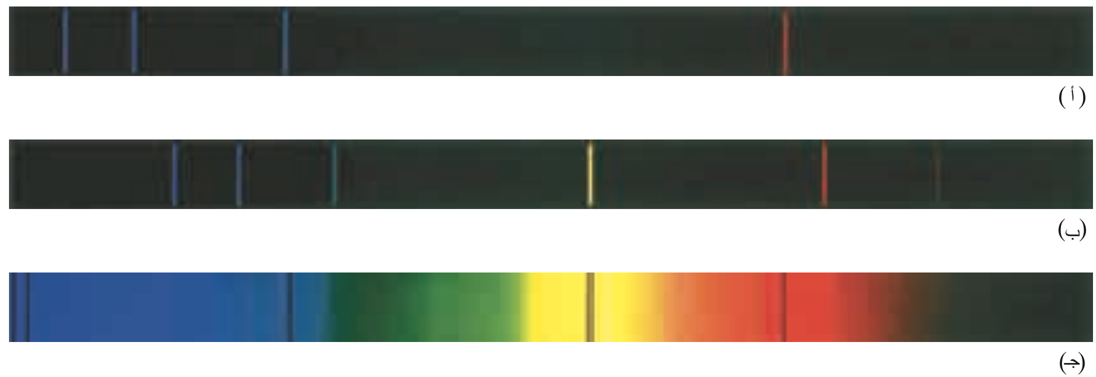


الشكل 27 - 20 أنبوب تفريغ - غازي : (أ) مخطط. (ب) صورة لأنبوب تفريغ حقيقي للهيدروجين.

تمّ ملاحظة الإشعاعات من الغازات المهيجة سابقا في القرن التاسع عشر. وَوُجِدَ أنّ الطيف لم يكن مستمرا. بل متقطعا. وبما أنّ الغازات المهيجة تشع ضوءا بأطوال موجية معينة. وعندما يُحلل هذا الضوء خلال شق المطياف أوجهاز قياس الطيف. فإنّ طيفا خطيّا يشاهد بدلا من طيفٍ مستمر . **الأطياف الخطية** المشعة من عددٍ من العناصر في المنطقة المرئية مبينة في (الشكل 27 – 21). وكذلك في (الفصل 24) (الشكل 24 – 28). **طيف الانبعاث** مميّز للمادة ويمكن أن يخدم "كبصمة" للتعرف إلى الغاز.

كما رأينا في (الفصل 24) أنه إذا مرّ طيفٌ مستمر خلال غاز نادر. فمن الممكن حينئذٍ ملاحظة خطوط داكنة في الطيف الناتج. عند أطوال أمواج تعود لخطوط يتمّ إشعاعها في العادة بوساطة الغاز. ويُدعى هذا بـ **طيف الامتصاص** (الشكل 27 – 21 جـ). وأصبح من الواضح أنّ الغازات تستطيع أن تمتص الضوء عند الترددات نفسها التي تبعث عنها. وباستخدام غشاء حسّاس للضوء فوق البنفسجي للضوء تحت الأحمر. وُجِدَ أنّ الغازات تشعّ وتمتص ترددات متقطعة في هذه المناطق إضافة إلى المنطقة المرئية.

الشكل 27 - 21 أطياف انبعاث للغازات: (أ) هيدروجين ذري . (ب) هيليوم. (جـ) طيف الامتصاص الشمسي.



في الغازات قليلة الكثافة، تكون الذرات أكثر بعدًا عن بعضها بالمتوسط. وعليه، يمكن اعتبار الضوء المنبعث أو الممتص ناتجًا من ذرات مفردة بدلا من التفاعل بين الذرات، كما في المادة الصلبة، أو السائلة، أو الغازات الكثيفة. ولذلك، فإنّ الطّيف الخطّيّ يساعد كمفتاح لتركيب الذرة؛ وأيّ نظرية في التركيب الذري يجب أن تكون قادرة على تفسير سبب انبعاث الضوء من الذرات فقط على شكل أطوال أمواج متقطعه، ويجب أن تستطيع التنبؤ بأطوال الأمواج هذه.

إنّ أبسط ذرة هي ذرة الهيدروجين — وهي تمتلك إلكترونا وحيدًا يدور حول نواتها. كما أنّها تمتلك أبسط طيف أيضًا. وأطياف معظم الذرات تبدي قليلا من الانتظام الظاهر. إلّا أنّ المسافة بين الخطوط في طيف الهيدروجين تتناقص بشكل منتظم (الشّكل 27 – 22). وبالفعل، فقد أثبت " جي جي بالمر" (1825 – 1898) في عام 1855 أنّ الخطوط الأربعة في المنطقة المرئية لطيف الهيدروجين (وأطوال أمواجها المقيسة هي 656 nm، و 486 nm، و 434 nm و 410 nm) لها أطوال أمواج تتبع الصيغة

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad n = 3, 4, \cdots \qquad \textbf{(9-27)}$$

وتأخذ n هنا القيم 3، و 4، و 5، و 6 للخطوط المرئية الأربعة. ويُدعى R **ثابت ردبيرغ**، وقيمته هي $R = 1.0974 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$. ووُجِدَ لاحقا أنّ سلسلة **خطوط بالمر الممتدة** إلى منطقة فوق البنفسجي UV تنتهي عند $\lambda = 365\ \text{nm}$ كما هو مبين في (الشكل 27 – 22). وتنطبق صيغة بالمر أيضا (المعادلة 27 – 9) على الخطوط ذات أعداد n الصحيحة والمرتفعة. وأصبح من الصعب التفريق بين الخطوط القريبة من 365 nm؛ لالتصاقها الكبير ببعضها بعضا. كما وتنطبق حدود السلسلة عند 365 nm على $n = \infty$ (ولذلك فإنّ $1/n^2 = 0$ في المعادلة 27 – 9).

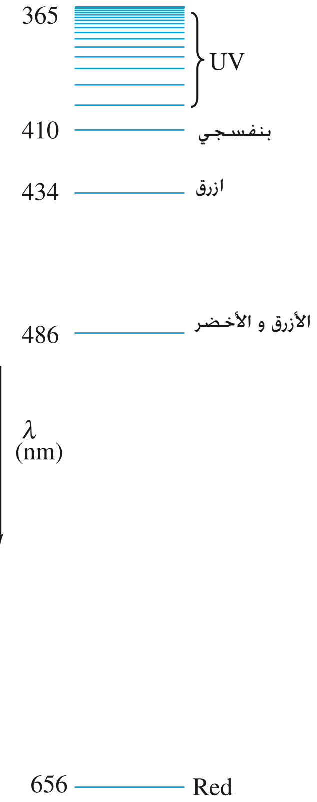
ولاحقًا، أظهرت التجارب على الهيدروجين أنّ هناك سلاسل متشابهة للخطوط في المنطقتين UV و IR، وكلّ سلسلةٍ لها نمط مشابه لسلسلة بالمر، ولكن بأطوال أمواج مختلفة (الشكل 27 – 23). ووُجِدَ أنّ كلًا من هذه السلاسل تنطبق على صيغة مشابهة لشكل (المعادلة 27 – 9) ولكن مع استبدال $1/1^2, 1/3^2, 1/4^2$، وهكذا دواليك. وعلى سبيل المثال، تحتوي **سلسلة ليمان** على خطوطٍ بأطوال أمواج من 91 nm إلى 122 nm (في منطقة UV) وتنطبق على الصيغة

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad n = 2, 3, \cdots$$

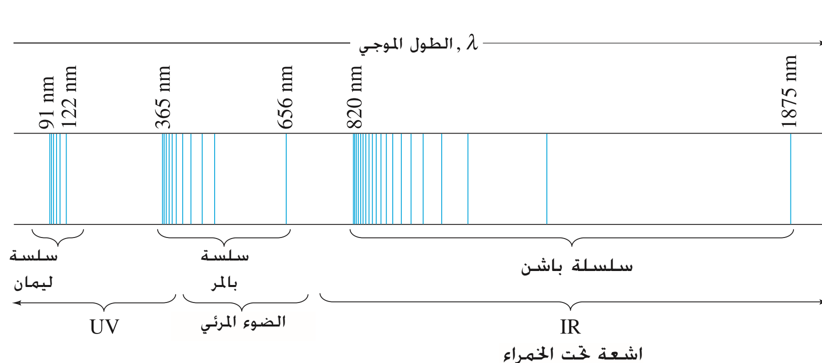
وتنطبق أطوال الأمواج في **سلسلة باشن** (في منطقة IR) على الصيغة

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad n = 4, 5, \cdots$$

ولم يستطع نموذج رذرفورد تفسير سبب انبعاث الأطياف الخطية من الذرات . كما واجه أيضًا صعوبات أخرى. وحسب نموذج رذرفورد، فإنّ الإلكترونات تدور حول النواة، وبما أنّ مساراتها منحنية، فإنّ الإلكترونات تتسارع. ولذلك يجب أن تشعّ ضوءًا كأيّ شحنةٍ كهربائيةٍ تتسارع (الفصل 22). وبما أنّ الضوء يحمل طاقة، وهذه الطاقة محفوظة، فإنّ طاقة الإلكترون الذاتية يجب أن تنقص للتعويض. وعليه، فمن المتوقع من الإلكترون أن



الشكل 27 - 22 سلاسل بالمر لخطوط الهيدروجين.



الشكل 27 - 23 الطيف الخطي لذرة الهيدروجين. كل سلسلة تنطبق على الصيغة

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

حيث

$n' = 1$ لسلسلة ليمان

$n' = 2$ لسلسلة بالمر

$n' = 3$ لسلسلة باشن. وهكذا دواليك. ويمكن لـ n أن تأخذ القيم الصحيحة جميعها من $n = n' + 1$ إلى مالا نهاية. والخطوط الوحيدة في المنطقة المرئية للطيف الكهرومغناطيسي هي جزء من سلسلة بالمر.

يتحرّك باتجاه النواة بحركةٍ لولبية. وخلال حركة الإلكترونات اللولبيّة هذه باتجاه النواة. تزداد تردّداتها خلال زمن قصير. وكذلك تردّد الضوء المنبعث. ولذلك. فإنّ الصعوبتين الرئيستين لنموذج رذرفورد هما كما يلي:
(1) تتنبأ النظرية بانبعاث ضوئي بمدى مستمر من الترددات. في حين أظهرت التجارب أطيافا خطّيّة .
(2) تنبأت النظرية بأنّ الذرات غير مستقرة. – ستتبع الإلكترونات مسارا لولبيا بسرعة باتجاه النواة- لكننا نعلم أنّ الذرات عموما مستقرة؛ لوجود مادة مستقرة حولنا في كلّ مكان.

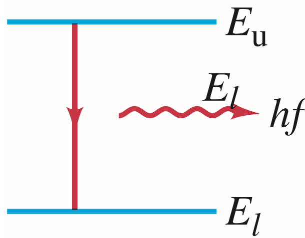
ومن الواضح أنّ نموذج رذرفورد كان غير كاف. وهناك حاجة بشكل ما إلى التعديل. وقدّم هذا التعديل "نيل بور" بنموذج احتوى على الفرضية الكمية. وعلى الرغم من أنّ نموذج بور قد عُدّل بعد ذلك. إلاّأنه كان خطوة حاسمة لصياغة فهمنا الحالي. وبعض جوانب نموذج بور لا تزال مفيدة إلى يومناهذا. ولذلك سنختبرها بالتفصيل في البند القادم.

12-27 نموذج بور

درس بور في مختبر رذرفورد لعدة أشهر خلال عام 1912 وكان قد اقتنع لدرجةٍ ما بصحة نموذج رذرفورد الكواكبي للذرة. ولكي يجعل النموذج قابلا للتطبيق؛ شعر بور أنّ النظرية الكمّية المطوّرة حديثا يجب أن تدرج بطريقة ما في النموذج. وأظهر عمل كلّ من بلانك وآينشتاين على الأجسام الصلبة الساخنة. أنّ طاقة الشحنات الكهربائية المتذبذبة يجب أن تتغير بصورة غير مستمرة – من حالة طاقة محددة إلى أخرى. ليتصاحب هذا التغير مع انبعاث كمّ من الضوء. وربما جادل بور. بأنّ الإلكترونات في ذرّة ما لا يمكن لها أن تفقد طاقة بصورة مستمرة أيضا. ولكن يجب أن تقوم بذلك في "قفزات" كمّية .
وخلال بنائه لنموذجه على امتداد عام تالٍ. اقترح بور مُسلمة حركة الإلكترونات لتدور حول النواة في أفلاكٍ دائرية. ومع هذا. فقد حدّد أفلاكًا معينة مسموحة. وزاد مقترحًا أيضًا هو أنّ الإلكترون يمتلك في كل فلكٍ طاقة محددة. ويتحرك في الفلك دون أن يشعّ أيّ طاقة (بالرغم من أنّ ذلك يتناقض مع الأفكار التقليدية؛ لأنّ الشحنات الكهربائية المسرعة يجب أن تشع أمواج EM. انظر الفصل 22). ولذلك أطلق على الأفلاك المحتملة **الحالات الساكنة**. واقترح أنّ الضوء ينبعث فقط عندما يقفز الإلكترون من مستوى ساكنٍ(علويّ) إلى مستوى آخر (سفليّ) ذي طاقة أقل. وعندما تحدث هذه القفزة. فإنّ فوتونا ضوئيا وحيدا ينبعث وتعطى طاقته حسب مبدأ حفظ الطاقة كالتالي:

حالة ساكنة

$$hf = E_u - E_l \qquad \textbf{(10 - 27)}$$



الشكل 27 - 24 تبعث ذرة فوتونا (طاقة $= hf$) عندما تتغير طاقتها من E_u إلى طاقة أقل E_l.

وتشير E_U إلى طاقة الحالة العلوية. في حين تشير E_l إلى طاقة الحالة السفلية. انظر (الشكل 27 – 24).
وبدأ بور سعيه لتحديد الطاقات التي ستمتلكها الأفلاك في أبسط ذرة؛ أي الهيدروجين. ليستطيع بعدئذ التنبؤ بالطيف الضوئي المنبعث حسب (المعادلة 27 – 10). ووجد بور المفتاح الذي كان يبحث عنه في صيغة بالمر. وقد وجد بسرعة أنّ نظريته ستتوافق مع صيغة بالمر إذ افترض أنّ زخم الإلكترون الزاوي L مكمى. ويساوي عددا صحيحا n مضروبا في $h/2\pi$. وكما رأينا في الفصل 8. فإنّ الزخم الزاوي يعطى بـ $L = I\omega$. حيث يمثل I عزم القصور الذاتي. و ω هي السرعة الزاوية. ولجسيم وحيد كتلته m يتحرك على محيط دائرة نصف قطرها r بسرعة v . $I = mr^2$ و $\omega = v/r$. لذلك $L = I\omega = (mr^2)(v/r) = mvr$ ويكون **الشّرط الكمّيّ** لبور

زخم زاوي مكمى

$$L = mvr_n = n\frac{h}{2\pi}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(11 - 27)}$$

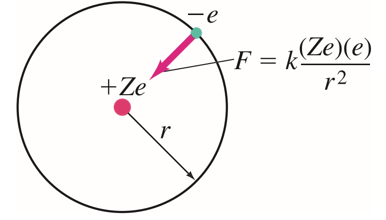
وتمثل n عددا صحيحا. و r_n نصف قطر الفلك n^{th} المحتمل. وقد رقّمت الأفلاك المسموحة 1. 2. 3. .... حسب قيمة n التي سميت **العدد الكمّيّ الرّئيس** للفلك.

عدد كمي ، n

لم تبنَ (المعادلة 27 – 11) على أساس نظري متين. ولكن بحث "بور" عن "شرط كمي" ما. ومحاولات مثل $E = hf$ (حيث تمثل E طاقة الإلكترون في الفلك) لم تفض إلى نتائج كتلك التجريبية.
وقد استخدم "بور" (المعادلة 27 – 11) لأنها ببساطة تحقق المطلوب. ونبحث الآن عن الكيفية. وبشكل خاص. دعنا نحدد بِمَ تتنبأ نظرية بور لأطوال الأمواج المقيسة للضوء المنبعث.

إلكترون ما في فلك دائري نصف قطره r (الشكل 27 − 25) يمتلك تسارعًا مركزيًّا v^2/r ناجًا من قوة التجاذب الكهربائية بين الإلكترون السالب والنواة الموجبة. وتعطى هذه القوة بقانون كولوم الآتي:

$$F = k\frac{(Ze)(e)}{r^2}$$



الشكل 27 - 25 القوة الكهربائية (قانون كولوم) تبقي الإلكترون السالب في فلك حول النواة موجبة الشحنة.

حيث $k = 1/4\pi\epsilon_0 = 9.00 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$ والشحنة على الإلكترون $q_1 = -e$ وتلك على النواة $q_2 = +Ze$، وتمثل Z عدد الشحنات الموجبة* (أي البروتونات). ولذرة الهيدروجين $Z = +1$.
وحسب قانون نيوتن الثاني $F = ma$. نعوض عن F بدلالة قانون كولوم و $a = v^2/r_n$ لفلكٍ (لمدار) معين مسموح به نصف قطره r_n. فنحصل على مايلي:

$$F = ma$$

$$k\frac{Ze^2}{r_n^2} = \frac{mv^2}{r_n}$$

ونحلّ لإيجاد r_n

$$r_n = \frac{kZe^2}{mv^2}$$

وبعد ذلك نعوض لإيجاد v من (المعادلة 27 − 11) (والتي تعطي $v = nh/2\pi mr_n$):

$$r_n = \frac{kZe^2 4\pi^2 mr_n^2}{n^2h^2}$$

ونحلّ لإيجاد r_n (تظهر على جانبي المعادلة. فنختصر واحدة منهما):

$$r_n = \frac{n^2h^2}{4\pi^2 mkZe^2} = \frac{n^2}{Z}r_1 \qquad \textbf{(12 - 27)}$$

ويكون

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2}$$

تعطي (المعادلة 27 − 12) أنصاف الأقطار لكلّ فلكٍ ممكن. وأصغر فلك يكون لـ $n = 1$. وقيمته للهيدروجين $(Z = 1)$

$$r_1 = \frac{(1)^2(6.626 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s})^2}{4(3.14)^2(9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})(9.00 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C})^2}$$

$$r_1 = 0.529 \times 10^{-10}\,\mathrm{m} \qquad \textbf{(13 - 27)}$$

نصف قطر بور

ويُدعى في بعض الأحيان نصف قطر أصغر فلك في ذرة الهيدروجين، r_1، بـ **نصف قطر بور**. ومن (المعادلة 27 − 12). نرى أنّ أنصاف أقطار أكبر الأفلاك** تزداد بدلالة n^2. ولذلك فإنّ

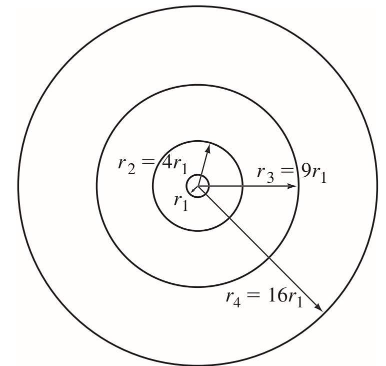
$$r_2 = 4r_1 = 2.12 \times 10^{-10}\,\mathrm{m},$$
$$r_3 = 9r_1 = 4.76 \times 10^{-10}\,\mathrm{m},$$
$$\vdots$$
$$r_n = n^2 r_1, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

الشكل 27 - 26 أفلاك ممكنة في نموذج بور للهيدروجين: $r_1 = 0.529 \times 10^{-10}\,\mathrm{m}$

أول أربعة أفلاك مبينة في (الشكل 27 − 26). لاحظ أنه، بالنسبة إلى نموذج بور، يمكن للإلكترون أن يوجد فقط في أفلاك تُعطى وفق (المعادلة 27 − 12). ولا توجد أيّ أفلاك مسموحة أخرى بينها.
ولذرة ذات $Z \neq 1$. نستطيع أن نكتب أنصاف الأقطار الفلكية r_n باستخدام (المعادلة 27 − 12):

$$r_n = \frac{n^2}{Z}(0.529 \times 10^{-10}\,\mathrm{m}), \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \quad \textbf{(14 - 27)}$$

وفي كلّ فلكٍ من الأفلاك الممكنة. يمكن للإلكترون أن يمتلك حسب نموذج بور



* نشمل Z في اشتقاقاتنا بحيث نستطيع أن نتعامل مع الذرات الأخرى أحادية الإلكترون ("المشابهة للهيدروجين") مثل الأيونات التالية He^+ $(Z = 2)$ و Li^{2+} $(Z = 3)$. يمتلك الهيليوم في الحالة المتعادلة إلكترونين. فإذا فقد إلكترونا واحدا. فإنّ أيون H^+ المتبقي سيتكون من إلكترون واحد يدور حول نواة شحنتها He^+. وبالمثل. الليثيوم ثنائي التأين. Li^{2+}. له أيضا إلكترون وحيد. وفي هذه الحالة $Z = 3$.

** كن حذرا. ولا تصدق أنّ هذه الأفلاك المعرفة جيدا موجودة في الحقيقة. واليوم يعتقد أنّ الإلكترونات تشكّل "غيوما" كما ستناقش في(الفصل 28).

طاقة محددة. كما تظهر الحسابات التالية. تعادل الطاقة الكلية مجموع الطاقتين: الحركية والوضع. وتُعطى طاقة وضع الإلكترون كالتالي: $\text{PE} = qV = -eV$، حيث تمثل V الجهد الناتج من شحنة نقطية $+Ze$ كما أعطي وفق (المعادلة $17 - 5$). $V = kQ/r = kZe/r$:ولذلك

$$\text{PE} = -eV = -k\frac{Ze^2}{r}$$

إنّ الطاقة الكلية E_n لإلكترون في الفلك n^{th} ذي نصف القطر r_n هي مجموع طاقتي الحركة والوضع

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{kZe^2}{r_n}$$

وعندما نعوّض v من (المعادلة $27 - 11$) و r_n من (المعادلة $27 - 12$) في هذه المعادلة، نحصل على

مستويات طاقة

$$E_n = -\frac{2\pi^2 Z^2 e^4 mk^2}{h^2}\frac{1}{n^2} \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(15 - 27 أ)}$$

وإذا قَيَّمْنَا الحدّ الثابت في (المعادلة $27 - 15$) أ وحوّلْناه بدلالة الإلكترون فولت، كما هو متّبع عادةً في الفيزياء الذرية، فسنحصل على

الحالة الأرضية للهيدروجين

$$E_n = -(13.6\ \text{eV})\frac{Z^2}{n^2}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \textbf{(15- 27 ب)}$$

أخفض مستوى طاقة $(n = 1)$ للهيدروجين $(Z = 1)$

$$E_1 = -13.6\ \text{eV}$$

وبما أنّ n^2 تظهر في مقام (المعادلة $27 - 15$ ب)، فإنّ طاقة الأفلاك الأكبرفي الهيدروجين $(Z = 1)$ تعطى كالتالي:

$$E_n = \frac{-13.6\ \text{eV}}{n^2}$$

وعلى سبيل المثال

الحالات المثارة (أول اثنتين)

$$E_2 = \frac{-13.6\ \text{eV}}{4} = -3.40\ \text{eV}$$

$$E_3 = \frac{-13.6\ \text{eV}}{9} = -1.51\ \text{eV}$$

ليست أنصاف الأقطار هي الوحيدة المكمية، فالطاقة مكمية كذلك كما يظهر من (المعادلتين $27 - 15$). إنّ العدد الكمي n الذي يرمز إلى أنصاف الأقطار يرمز إلى مستويات الطاقة أيضا. وأنّ مقدار أخفض **مستوى طاقة** أو **حالة طاقة** هو E_1 وتدعى الحالة الأرضية. والحالات الأعلى، E_2 و E_3، وهكذا دواليك، تدعى **الحالات المهيجة (المثارة)**.

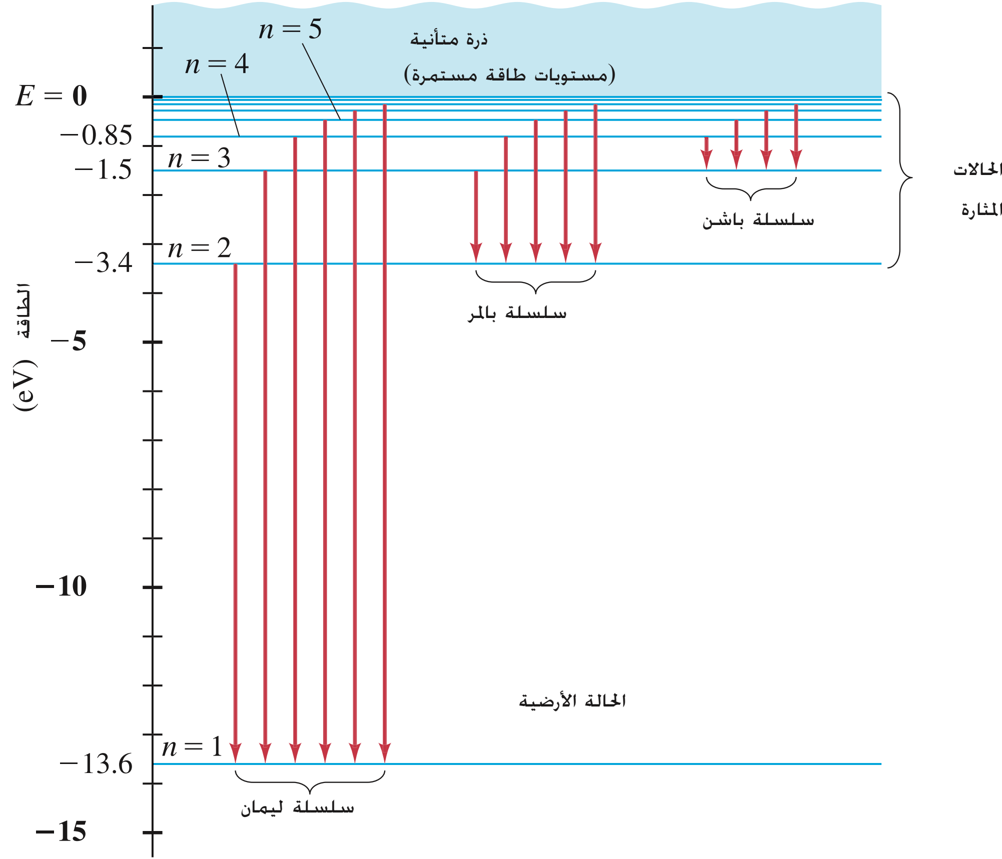
ولاحظ أنه بالرغم من أنّ طاقة الأفلاك الكبيرة لها قيم عددية أقلّ، فإنّ الطاقات جميعها أقلّ من الصفر. ولذلك، فإنّ $-3.4\ \text{eV}$ هي طاقة أكبر من $-13.6\ \text{eV}$. ويترتب على ذلك أنّ الفلك الأقرب للنواة (r_1) يمتلك أقلّ طاقة. والسبب وراء القيم السالبة للطاقات يرتبط بالطريقة التي عرّفنا بها صفر طاقة الوضع. ولشحنتين نقطتين، $\text{PE} = kq_1q_2/r$ تكافئ صفر PE عندما تكون المسافة الفاصلة بينهما تصل إلى مالانهاية كما نوقشت في (البند $17 - 5$). ولذلك، فإنّ إلكترونا يستطيع بالكاد أن يتحرر من الذرة بالوصول إلى $r = \infty$ (أو، على الأقل، بالابتعاد عن النواة) مع طاقة حركية تساوي صفرا، سيمتلك $E = \text{KE} + \text{PE} = 0 + 0 = 0$ ناتجة من $n = \infty$ في (المعادلتين $27 - 15$). وإذا كان إلكترون ما حُرًّا وله طاقة حركية ما، فإنّ $E > 0$. ولإزالة إلكترون ما يمثل جزءا من ذرة ما؛ يجب أن تتوافر طاقة مدخلة (وعدا عن ذلك فإنّ الذرات لن تكون ثابتة). وبما أنّ $E \geq 0$ للإلكترون الحُرّ، فإنّه من المنطقي أن يمتلك أيّ إلكترون مرتبط بذرّة $E < 0$. أي أنه يجب أن تضاف طاقة لرفع مقدار طاقة الإلكترون الكلية من قيمة سالبة ما إلى الصفر من أجل تحريره من موضعه.

طاقة الترابط (طاقة التأين).

تُدعى الطاقة الدنيا اللازمة لإزالة إلكترون من الحالة الأرضية لذرة ما **طاقةَ التّرابط** أو **طاقة التّأيّن** . قيست طاقة تأين الهيدروجين فوُجدت أنها $13.6\ \text{eV}$، وهذا يرتبط تماما بإزالة الإلكترون من أخفض حالة، $E_1 = -13.6\ \text{eV}$ ، نحو الأعلى إلى $E = 0$ حيث يمكنه أن يكون حُرًّا.

من المفيد إظهار مختلف قيم الطاقة الممكنة كخطوط أفقية على مخطط مستوى – طاقة . وهذا مبين للهيدروجين في (الشكل 27 – 27).* يمكن أن يكون الإلكترون في ذرة الهيدروجين في أيّ من هذه المستويات حسب نظرية بور. ولكن لا يمكن له أن يكون بين ذلك. ولنقل عند −9.0 eV. وعند درجة حرارة الغرفة، فإنّ معظم ذرات H تقريبا ستكون في الحالة الأرضية ($n = 1$). وعند درجات الحرارة الأعلى، أو خلال تفريغ كهربائي، عندما يكون هناك تصادمات كثيرة بين الإلكترونات الحرة والذرات، يمكن لذرات كثيرة أن تكون في حالات مهيجة ($n > 1$). وعندما يكون إلكترون ذرة ما في الحالة المهيجة، فإنّه يستطيع أن يقفز نحو الأسفل إلى حالة أخفض، معطيًا فوتونًا في تلك العملية. وهذا طبقًا لنموذج بور، يمثل الأصل في أطياف انبعاث الغازات المهيجة.

تفسير انبعاث الأطياف الخطية



الشكل 27 - 27 مخطط مستوى - طاقة لذرة هيدروجين، يظهر أساس الأطياف الخطية لسلاسل لايمان وبالمر وباشن (الشكل 27 - 23). كل سهم رأسي يمثل انتقالا ذريا محفزا لفوتونات أحد الأطياف الخطية (طول موجي وحيد أو تردد).

تمثّل الأسهم الرّأسيّة في(الشّكل 27 – 27) انتقالات أو قفزات ترتبط بمختلف الأطياف الخطية الملاحظة. وعلى سبيل المثال، يحفز الإلكترون الذي يقفز من مستوى $n = 3$ إلى $n = 2$ الخطّ 656-nm في سلسلة بالمر، في حين تحفّز القفزة من $n = 4$ إلى $n = 2$ الخط 486-nm (انظر الشكل 27 – 22). ونستطيع التنبؤ بأطوال أمواج الأطياف الخطية المنبعثة بدمج (المعادلة 27 – 10) مع (المعادلة 27 – 15). وبما أنّ $hf = hc/\lambda$. فسنحصل من (المعادلة 27 – 10) على

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{hf}{hc} = \frac{1}{hc}(E_n - E_{n'})$$

وتشير n إلى الحالة العليا، أمّا n' فتشيرإلى الحالة السفلى. وباستخدام (المعادلة 27 – 15) بعد ذلك،

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 mk^2}{h^3 c}\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad \textbf{(16- 27)}$$

وهذه الصيغة النظرية لها شكل صيغة بالمر العملية نفسها (المعادلة 27 – 9)، مع $n' = 2$. ولذلك فإننا نرى أنّ سلسلة خطوط بالمر تعود إلى انتقالات أو "قفزات" تهبط بالإلكترون نحو الأسفل إلى مستوى الطاقة الثاني. وبالمثل، تعود $n' = 1$ إلى سلسلة لايمان، في حين تعود $n' = 3$ إلى سلسلة باشن (انظر الشكل 27 – 27).

*لاحظ أنّ الإلكترون سيكون حُرّا عندما تكون طاقته أعلى من $E = 0$، ويستطيع أن يمتلك أيّ طاقة (تكون E عندها غير مكمية). لذا، فهناك حالات من الطاقة المستمرة فوق $E = 0$، كما يظهر في مخطط مستوى - طاقة (الشكل 27 – 27).

وُجِدَ أنّ قيمة الثابت في (المعادلة 27 − 16) عندما $Z = 1$، تتفق مع قيمة ثابت ردبيرج المقيسة، $R = 1.0974 \times 10^{7}\ \mathrm{m^{-1}}$ في (المعادلة 27 − 9). وتتطابق مع التجربة أيضا (انظر المسألة 53).

تفسير خطوط الامتصاص.

والنجاح الباهر لنموذج بور هو إعطاؤه التفسيرالمناسب لانبعاث الأطياف الخطية من الذرات، وكذلك تنبؤه الدقيق بأطوال أمواج الضوء المنبعث من الهيدروجين. ويفسّر نموذج بور أيضا أطياف الامتصاص: فوتونات بأطوال أمواج مناسبة يستطيع كلّ منها دفع إلكترون ما من أحد مستويات الطاقة لينقله إلى مستوى أعلى. ولكي تحفظ الطاقة، فإنّ الفوتونات ذات الطاقة المناسبة فقط سيتم امتصاصها. وهذا يفسّر خروج الطيف الضوئي المستمر الداخل على غاز ما مصحوبا بخطوط (امتصاص) داكنة عند ترددات مرتبطة بخطوط انبعاث (الشكل 27 − 21 جـ).

وتؤكد نظرية بور أيضًا اتزان الذرّات. فهي تؤسس الاتزان بالقانون: الحالة الأرضية هي أخفض حالة للإلكترون، ولا يوجد أيّ مستوى طاقة أقلّ يستطيع أن يذهب إليه لينبعث منه طاقة أكثر. وفي النهاية، كما رأينا بالأعلى، تتنبأ نظرية بور بطاقة تأين مقدارها 13.6 eV للهيدروجين. ومع هذا، فلم يكن نموذج بور ناجحا تماما مع الذرات الأخرى، وتمّ تعديله كما سنناقش في الفصل القادم. ونناقش نموذج بور؛ لأنه كان بداية مهمة؛ ولأننا لا نزال نستخدم مبدأ الحالات الساكنة، والحالة الأرضية، والانتقال بين الحالات. كما أنّ المصطلحات المستخدمة في نموذج بور لا تزال مستخدمة من قبل الكيميائيين وعلماء التحليل الطيفي.

المثال 27-12 طول موجة خط لايمان

استخدم (الشكل 27 − 27) لتحدد الطول الموجي لأوّل خطّ للايمان، الانتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$. في أي منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي يقع هذا الخط؟

النّهج: نستخدم (المعادلة 27 − 10)، $hf = E_{\mathrm{u}} - E_{l}$، الطاقات المأخوذة من (الشكل 27 − 27) لإيجاد طاقة الانتقال وطول موجته. يتمّ تحديد منطقة الطيف الكهرومغناطيسي باستخدام الطيف الكهرومغناطيسي EM في (الشكل 22 − 8).

الحلّ: في هذه الحالة .

$$hf = E_2 - E_1 = \{-3.4\ \mathrm{eV} - (-13.6\ \mathrm{eV})\} = 10.2\ \mathrm{eV} = (10.2\ \mathrm{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{J/eV}) = 1.63 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}.$$

وبما أنّ $\lambda = c/f$ فإنّ

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s})(3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s})}{1.63 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}} = 1.22 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}$$

أو 122 nm، وهو في منطقة UV من الطيف EM (الشكل 22 − 8). انظر أيضًا (الشكل 27 − 23).

ملحوظة: كنهج آخر يمكن استخدام (المعادلة 27 − 16) لإيجاد λ التي ستعطي النتيجة ذاتها.

المثال 27-13 طول موجة خط بالمر

حدّد طول موجة الضوء المنبعث عندما تقوم ذرة هيدروجين بالانتقال من $n = 6$ إلى $n = 2$ حسب نموذج بور.

النّهج: نستطيع استخدام (المعادلة 27 − 16) أو (المعادلة 27 − 9) التي تكافؤها، مع $R = 1.097 \times 10^{7}\ \mathrm{m^{-1}}$.

الحلّ: نوجد

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^{7}\ \mathrm{m^{-1}})\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{36}\right) = 2.44 \times 10^{6}\ \mathrm{m^{-1}}$$

ولذلك $\lambda = 1/(2.44 \times 10^{6}\ \mathrm{m^{-1}}) = 4.10 \times 10^{-7}$ أو 410 nm وهذا هو الخط الرابع في سلسلة بالمر (الشكل 27 − 22)، ولونه بنفسجي.

المثال 27-14 **طول موجة امتصاص**

استخدم (الشكل 27 − 27) لتحدد أعلى طول موجي يستطيع أن يمتصه الهيدروجين وهو في حالته الأرضية. وما ثاني أقصر طول موجي يمكن أن يحقق ذلك؟

النّهج: إنّ أعلى طول موجي يرتبط بأدنى طاقة سيكون بمثابة القفز من الحالة الأرضية إلى أوّل حالة مهيجة (الشكل 27 − 27). ويحدث أصغر طول موجي تالٍ للقفزة من الحالة الأرضية إلى الحالة المهيجة الثانية. وفي كلّ وضع، يمكن استخدام فرق الطاقة لإيجاد الطول الموجي.

الحلّ: الطاقة اللازمة للقفز من الحالة الأرضية إلى أوّل حالة مهيجة هي: $13.6\text{ eV} - 3.4\text{ eV} = 10.2\text{ eV}$. الطول الموجي اللازم، كما رأينا في (المثال 27 − 12)، 122 nm. أمّا الطاقة اللازمة للقفز من الحالة الأرضيّة إلى ثاني حالة مهيجة فهي: $13.6\text{ eV} - 1.5\text{ eV} = 12.1\text{ eV}$ والتي تعود لطول موجي

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{hf} = \frac{hc}{E_3 - E_1}$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\text{ m/s})}{(12.1\text{ eV})(1.60 \times 10^{-19}\text{ J/eV})} = 103\text{ nm}$$

أمثلة إضافية

المثال 27-15 **طاقة التأين**

(أ) استخدم نموذج بور لتحدد طاقة تأين أيون He^+ الذي يمتلك إلكترونا واحدا. (ب) احسب أيضًا أعلى طول موجي ممكن لفوتون يسبّب تأيّنا.

النّهج: نريد أن نحدد أقل طاقة لازمة لرفع الإلكترون من حالته الأرضية ليصل إلى الحالة الحرّة عند $E = 0$. وتعطى طاقة الحالة الأرضية لأيون الهيليوم He^+ وفق (المعادلة 27 − 15) ب مع $n = 1$ و $Z = 2$.

الحلّ: (أ) بما أنّ الرموزجميعها في (المعادلة 27 − 15 ب) هي نفسها لذرة الهيدروجين، ماعدا كون $Z = 2$ بدلا من 1، فإننا سنرى أنّ E_1 ستكون $Z^2 = 2^2 = 4$ أضعاف E_1 للهيدروجين. أي أنّ

$$E_1 = 4(-13.6\text{ eV}) = -54.4\text{ eV}$$

ولذلك، فمن الضروري توافر 54.4 eV لكي يتأين He^+، وتتوافق هذه القيمة مع التجربة.

(ب) سيكون أكبر طول موجي لفوتون يستطيع أن يسبب تأيّنا سيكون له طاقة مقدارها $hf = 54.4\text{ eV}$ وطول موجي

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{hf} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\text{ m/s})}{(54.4\text{ eV})(1.60 \times 10^{-19}\text{ J/eV})} = 22.8\text{ nm}$$

لذا، إذا كانت $\lambda > 22.8\text{ nm}$، فلن يحدث التأين.

ملحوظة: إذا امتصت الذرة فوتونا ذا طاقة عالية (طول موجة أقصر من 22.8 nm)، فيمكنها أن تتأيّن وسيبقى للإلكترون المحرّر طاقة حركية خاصة به.

وفي هذا المثال الأخير، رأينا أنّ E_1 لأيون He^+ هي سالبة بمقدار أربعة أضعاف أكثر من تلك للهيدروجين. وبالفعل، فإنّ مخطط مستوى - الطاقة He^+ يبدو تمامًا مثل ذلك للهيدروجين (الشكل 27 − 27)، غير أنّ القيم العددية لكلّ مستوى طاقة أكبر بأربع مرات. ومع هذا، لاحظ أننا نتكلم هنا عن أيون He^+. يمتلك الهيليوم (المتعادل) العادي إلكترونين ومخطط مستوى طاقته مختلف تمامًا.

المثال المفاهيمي 16-27 **هيدروجين عند 20°C**

قدّر متوسط الطاقة الحركية لذرات هيدروجين كاملة (وليس للإلكترونات فقط) عند درجة حرارة الغرفة. واستخدم الناتج لتفسّر سبب أنّ ذرات H جميعها تقريبًا هي في الحالة الأرضية عند درجة حرارة الغرفة، ولا ينبعث عنها أي ضوء.

الإجابة: بناءً على النظرية الحركية (الفصل 13)، يُعطى متوسط الطاقة الحركية KE للذرات أو الجزيئات في الغاز وفق (المعادلة 13 – 8)

$$\overline{\text{KE}} = \tfrac{3}{2}kT$$

وتمثل $k = 1.38 \times 10^{-23}\,\text{J/K}$ ثابت بولتزمان، و T هي درجة الحرارة (المطلقة) بالكلفن. ودرجة حرارة الغرفة هي حوالي $T = 300\,\text{K}$. ولذلك فإنّ

$$\overline{\text{KE}} = \tfrac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23}\,\text{J/K})(300\,\text{K}) = 6.2 \times 10^{-21}\,\text{J}$$

أو بدلالة الإلكترون فولت

$$\overline{\text{KE}} = \frac{6.2 \times 10^{-21}\,\text{J}}{1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}} = 0.04\,\text{eV}$$

لذا، فإنّ متوسط KE لذرة كاملة صغير جدّا مقارنة بالطاقة بين مستوى الاستقرار ومستوى الطاقة الأعلى التالي هو $(13.6\,\text{eV} - 3.4\,\text{eV} = 10.2\,\text{eV})$. وأيّ ذرات في حالة التهيج تهبط بسرعة إلى الحالة الأرضية وتبعث ضوءا. وعندما تكون في الحالة الأرضيّة، تصبح تصادماتها مع الذرات الأخرى قادرة على نقل $0.04\,\text{eV}$ من الطاقة فقط بالمتوسط. وأنّ جزءا صغيرا من الذرات يمكن أن يمتلك طاقة أكثر من ذلك بكثير (انظر البند 13 – 11 عن توزيع السرعات الجزيئية). ومع هذا، فإنّ KE تعادل 10 أضعاف المتوسط ليست كافية نهائيًا لتهيج الذرّات فوق الحالة الأرضية. وبناءً على ذلك، وعند درجة حرارة الغرفة، تكون الذرات جميعها تقريبا في الحالة الأرضية. ويمكن للذرات أن تثار لمستويات طاقة عالية بوساطة درجات حرارة عالية، أو بتمرير تيار إلكتروني عالي الطاقة خلال الغاز، كما في أنبوب التفريغ (الشكل 27 – 20).

مبدأ الاتفاق

يجب أن نلاحظ أنّ بور وضع بعض الفرضيات الجذرية التي كانت غير متفقة مع الأفكار التقليدية . فافترض أنّ الإلكترونات في الأفلاك الثابتة لا تشع ضوءا بالرغم من أنها تتسارع (تتحرك دائريًا) وافترض أنّ الزخم الزاوي مكمى. بالإضافة إلى ذلك، فإنّه لم يكن قادرا على تفسير كيفية تحرك الإلكترون عندما ينتقل من مستوى طاقة إلى آخر. وإضافة إلى ذلك، فليس هناك أيّ سبب حقيقي للتوقع، بأنه في العالم الضئيل للذرة، ستتصرف الإلكترونات كالأجسام عادية - الحجم. وبالرغم من هذا، فقد شعر أنه أينما تتقاطع النظرية الكمية مع العالم الجاهري، فيجب عليها أن تتنبأ بالنتائج التقليدية. وهذا هو **مبدأ الاتفاق** الذي ذكر سابقا في النسبية (البند 26 – 11). ويحقق هذا المبدأ نظرية بور لذرة الهيدروجين. وطاقات وأحجام الفلكين، ولنقل عندما $n = 1$ و $n = 2$ هي مختلفة تمامًا. ولكنّها ستكون قريبة جدّا من الفلكين $n = 100{,}000{,}000$ و $100{,}000{,}001$ حجما وطاقة (انظر الشكل 27 – 27). وبالفعل، سيكون القفزُ بين هذه الأفلاك الهائلة، والتي قد تصل إلى الأحجام الجاهرية دقيقًا. لذلك ستبدو هذه الأفلاك وكأنها متصلة، وهذا ما نتوقعه في العالم اليومي. مبدأ الاتفاق

وفي النهاية، يجب أن يؤكد على أنّ الأفلاك المعرفة بدقة لنموذج بور غير موجودة في الحقيقة. ونموذج بور ما هو إلا نموذج فقط، وليس حقيقة. وقد تمّ رفض فكرة الأفلاك الإلكترونية بعد عدة سنوات لاحقة، وبات ينظر إلى الإلكترونات (الفصل 28) على أنّها تشكّل "غيومًا احتمالية".

13-27 تطبيق نظرية دي برولي على الذرات

كانت نظرية بور لدرجة كبيرة تخدم هدفًا ما. ووُضِعت الفرضيات بحيث تتوافق النظرية مع التجربة العملية. ولكن لم يستطع بور أن يقدم أيّ تبرير عن سبب كون الأفلاك مكمية. أو كون الحالة الأرضية متزنة. وفي النهاية. وبعد عشر سنوات لاحقة. تمّ اقتراح السبب بوساطة لويس دي برولي. ولقد رأينا في (البند 27 − 8) في 1923 اقتراح دي برولي أنّ الجسيمات المادية مثل الإلكترونات؛ لها طبيعة موجية. وأنّ هذه الفرضية تمّ تأكيدها بالتجربة بعد عدة سنوات.

ولقد قدّمت إحدى مجادلات دي برولي الأصلية المنسجمة مع الطبيعة الموجية للإلكترونات تفسيرًا لنموذج بور لذرة الهيدروجين. وطبقًا لدي برولي . فإنّ جسمًا كتلته m. ويتحرك بسرعة غير نسبوية v. سيمتلك طولًا موجيًّا (المعادلة 27 − 8)

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

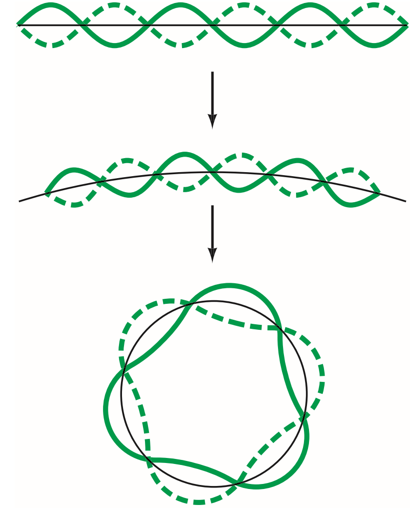
واقترح أنّ كلّ فلكٍ إلكتروني في ذرة ماهو فعليًا موجة عرضية. وكما رأينا في الفصل الحادي عشر. عندما يعزف وتر قيثارة أو كمان. فإنّ عددًا كبيرًا من أطوال الأمواج تثار. ومع هذا. فإنّ أطوال الأمواج تلك التي تمتلك عقدا عند النهايتين فقط هي التي تبقى. وهذه هي أنماط رنين الوتر. أمّا الأمواج ذات أطوال الأمواج الأخرى. فتتداخل مع بعضها بعد انعكاسها لتؤول اتساعاتها بسرعة إلى الصفر. ومع تحرك الإلكترونات في دوائر. حسب نظرية بور. جادل دي برولي في أنّ موجة الإلكترون هي موجة دائرية عرضية تغلق على نفسها (الشكل 27 − 28). وإذا لم يغلق الطول الموجي على نفسه. كما في (الشكل 27 − 29). يحدث تداخل هدّام خلال انتقال الموجة في دائرة مغلقة. ولتضمحل الموجة عندئذٍ بسرعة. ولذلك. فإنّ الموجات الوحيدة التي ستبقى هي تلك التي يحتوي عندها محيط الفلك الدائري على عددٍ صحيح من أطوال الأمواج (الشكل 27 − 30). محيط فلك بور لنصف قطر r_n هو $2\pi r_n$. وعندها يكون لدينا

$$2\pi r_n = n\lambda, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

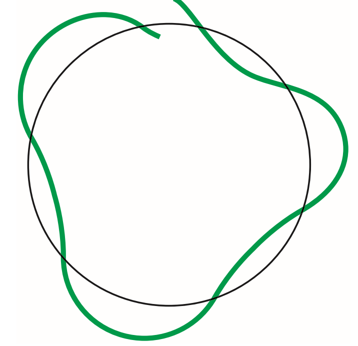
وعندما نعوض $\lambda = h/mv$ نحصل على $2\pi r_n = nh/mv$ أو

$$mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$$

وهذا هو الشّرط الكمّيّ الذي اقترحه بور ليخدم هدفًا ما (المعادلة 27 − 11). ومن هذه المعادلة تمّ اشتقاق الأفلاك المتقطعة ومستويات الطاقة. ولذلك. كان لدينا تفسير أوليّ للأفلاك الكمية وحالات الطاقة في نموذج بور: وهي نتيجة للطبيعة الموجية للإلكترون. فقط

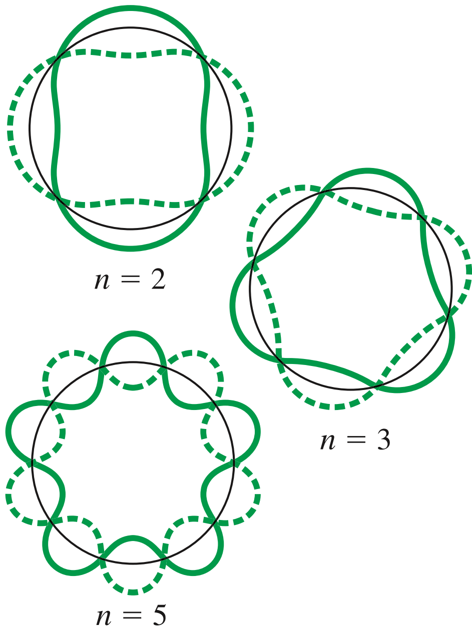


الشكل 27 - 28 موجة عادية عرضية مقارنة مع موجة دائرية عرضية.



الشكل 27 - 29 عندما لا تغلق موجة ما، (وكنتيجة لذلك تتداخل تداخلا هداما مع نفسها) ، فإنها تضمحل بسرعة.

الأفلاك المكمية هي نتيجة للطبيعة الموجية.



الشكل 27 - 30 أمواج دائرية عرضية لطولين موجيين، وثلاثة، وخمسة أطوال على المحيط. تمثل n العدد الكمي عند أطوال الأمواج أيضا.

موجات الرنين "العرضية" تستطيع أن تستمر.* وهذا يوحي أنّ الازدواجية الموجية - الجسيمية هي في صميم التركيب الذري.

وحسب رؤيتنا للأمواج الإلكترونية الدائرية في (الشكل 27 – 30)، يجب ألّا يتمّ التفكير بالإلكترون على أنّه يتبع نمط الموجة المهتزة. ففي نموذج بور للهيدروجين، يتحرك الإلكترون في دائرة. والموجه الدائرية، على الوجه الآخر تمثل اتساع "الموجة المادية" للإلكترون. وفي (الشكل 27 – 30) عُرض اتساع الموجة مركبا على المسار الدائري لفلك الجسم للسهولة.

لقد انطبقت نظرية بور بشكلٍ جيّدٍ على الهيدروجين والأيونات أحادية الإلكترون. ولكنّها لم تثبت نجاحها مع الذرات متعددة الإلكترونات. حيث إنها لم تستطع أن تتنبأ بالأطياف الخطية حتى مع ثاني أبسط ذرة: الهيليوم. إضافة إلى أنّها لم تستطع تفسير سبب اللمعان الأكثر لبعض خطوط الانبعاث مقارنة بالخطوط الأخرى، ولا سبب انقسام بعض الخطوط إلى خطين متلاصقين أو أكثر ("التركيب الدقيق"). لذا، كانت هناك حاجة إلى نظرية جديدة. وبالفعل، طوّرت نظرية جديدة في عشرينيّات القرن العشرين (1920s)، ودُعيت هذه النظرية الجديدة والثورية الميكانيكا الكمّيّة التي حلّت في النهاية مشكلة التركيب الذري. ولكنها أعطتنا نظرة مختلفة كليّا: فتمّ استبدال فكرة ". "الغيوم" الإلكترونية بدلا من فكرة الإلكترونات في أفلاك معرفة جيدا. وأعطتنا هذه النظرية الجديدة في الميكانيكا الكمية نظرة جديدة كليًّا عن الآليات الأساسية المسؤولة عن العمليات الفيزيائية.

* وبالرغم من ذلك، نلاحظ أنّ (المعادلة 27 – 11) لم تعد صالحة، كما سنناقش في الفصل القادم.

ملخص

إنّ أصول النظرية الكمية في **فرضية بلانك الكمية** هو أنّ الاهتزازات الجزيئية **مكمية**: طاقتها E يمكن أن تكون فقط مضاعفات hf مضروبة في عدد صحيح (n)، ويُمثل h ثابت بلانك، أمّا f فهو التردد الطبيعي للاهتزاز:

$$E = nhf \qquad (3 - 27)$$

وفسّرت هذه الفرضية الطيف الإشعاعي المنبعث بوساطة **جسم أسود** عند درجة حرارة مرتفعة.

اقترح آينشتاين لأجل بعض التجارب، إمكانية تخيل الضوء منبعثًا وممتصًّا (كجسيمات) **كمة** والتي نطلق عليها حاليا **الفوتونات** وطاقة كلّ منها

$$E = hf \qquad (4 - 27)$$

وزخمها

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad (6 - 27)$$

واقترح الأثر الكهروضوئي كاختبار لنظرية الفوتون الضوئية. وفي **الأثر الكهروضوئي**، تقول نظرية الفوتون: إنّ كلّ فوتون ساقط يمكن أن يصطدم بإلكترون في المادة فيخرجه عند امتلاكه لطاقة كافية . ولذلك، فإنّ أعلى طاقة للإلكترونات المخرجة ترتبط خطيّا بتردد الضوء الساقط.

ونظرية الفوتون تمّ دعمها أيضا بوساطة **أثر كومبتون** وملاحظة **إنتاج الثنائي** الإلكترون – البوزيترون.

تشير **ازدواجية الموجة – الجسيم** إلى فكرة أنّ الضوء والمادة (مثل الإلكترون) لهما خصائص موجية وجسيمية ويعطى الطول الموجي لجسم ما كالتالي:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (8 - 27)$$

ويمثل p زخم الجسم ($p = mv$ لجسم كتلته m وسرعته v).

يخبرنا **مبدأ التتام** أنّنا يجب أن نعي الخصائص الجسيمية والموجية للضوء والمادة لكي نفهمهما تمامًا.

تضم النماذج الأولية للذرة نموذج حلوى الخوخ الهلامية، ونموذج رذرفورد الكواكبي (أو النووي) للذرة الذي يتكون من نواة صغيرة جدًّا مشحونة بشحنة موجبة كبيرة محاطة (عند مسافات كبيرة نسبيّا) بإلكترونات.

ولتفسير **الأطياف الخطية** المنبعثة من الذرات، بالإضافة إلى اتزان الذرات، قدمت **نظرية بور** مُسلمات هي: (1) تستطيع الإلكترونات المرتبطة بذرة ما أن تحتل فقط أفلاكا ذات زخم زاوي محفوظ، والتي ينتج منها قيم متقطعة لنصف القطر والطاقة. (2) الإلكترون الموجود في **الحالة الساكنة** لا ينبعث عنه أي إشعاعات. (3) إذا قفز إلكترون ما إلى حالة أدنى،سينبعث عنه فوتون طاقته تساوي الفرق في الطاقة بين الحالتين.(4) الزخم الزاوي L للإلكترونات الذرية مكمى حسب القانون

$$L = \frac{nh}{2\pi} \qquad (11 - 27)$$

وتمثل n عددًا صحيحًا يُدعى **العدد الكمّيّ**. والحالة $n = 1$ هي **الحالة الأرضية** وطاقتها في الهيدروجين $E_1 = -13.6\,\text{eV}$. وترتبط القيم الأعلى لـ n **بالحالات المهيجة** وتكون طاقتها

$$E_n = -(13.6\,\text{eV})\frac{Z^2}{n^2} \qquad (15 - 27\ \text{ب})$$

وتهيج الذرات إلى هذه الحالات العليا بالتصادمات مع الذرات أو الإلكترونات الأخرى، أو بوساطة امتصاص فوتون بتردد صحيح تماما.

منح افتراض دي برولي أنّ الإلكترونات (ومواد أخرى) لها طول موجي $\lambda = h/mv$ تفسيرًا لأفلاك بور المكمية باستحضار ازدواجية الموجة – الجسيم: ترتبط الأفلاك بأمواج دائرية عرضية بحيث يساوي محيط الفلك عددًا صحيح من أطوال الأمواج.

أسئلة

.1 ماذا يمكن أن يُقال عن الحرارة النسبية للنجوم البيضاء – المصفرّة والحمراء والزرقاء؟ فسّر.

.2 إذا أشعت الأجسام جميعها طاقة، فلِمَ لا نستطيع أن نراها في الظلام؟ (انظر أيضا البند 14 – 8).

.3 هل ينتج مصباح ضوئي درجة حرارته 2500 K ضوءا أبيض كالذي تنتجه الشمس عند 6000 K؟ فسّر.

.4 تتمّ إنارة الغرف المعتمة المستخدمة لتطوير الأفلام البيضاء – والسوداء في بعض الأحيان بمصباح أحمر. لِمَ يستخدم هذا اللون بالتحديد؟ وهل يمكن استخدام هذا الضوء في غرفة معتمة لتطوير صور ملونة؟

.5 إذا إزداد طول موجة العتبة في الأثر الكهروضوئي عند تغيير الفلز الباعث بفلز آخر. فماذا تقول عن دالتي الشغل للفلزين؟

.6 فسّر السبب في دعم وجود تردد القطع في الأثر الكهروضوئي النظرية الجسيمية للضوء بدلا من النظرية الموجية؟

.7 يتسبّبُ الضوء فوق البنفسجي،UV باحمرار الجلد. ولا يسبّبُ ذلك الضوء المرئي. اذكر سببا واحدا لهذا.

.8 إذا استطار فوتون أشعة إكس بوساطة إلكترون. فهل سيتغير طول موجته؟ وإذا كانت الإجابة نعم. فهل الاستطارة بالازدياد أم بالنقصان؟

.9 في كلّ من الأثرين. الكهروضوئي وكومبتون. يصطدم فوتون مع إلكترون مسببا هروب الإلكترون. إذن. ما الفرق بين العمليتين ؟

.10 افترض مصدرا نقطيّا ضوئيّا. كيف يمكن لشدة الضوء أن تتغير مع البعد عن المصدر حسب : (أ) النظرية الموجية؟ (ب) نظرية (الفوتون) الجسيم ؟ هل يساعد هذا على التمييز بين النظريتين؟

.11 فسّر كيف يمكن استخدام الدارة الكهروضوئية في (الشكل 27–6) في (أ) جهاز إنذار سرقة. (ب) كاشف الدخان. (جـ) جهاز قياس الصور الضوئي.

.12 لماذا نقول إنّ للضوء خصائص موجية؟ ولِمَ نقول إنّ له خصائص جسيمية أيضًا؟

.13 لماذا نقول إنّ للإلكترونات خصائص موجية؟ ولِمَ نقول إنّ لها خصائص جسيمية أيضا؟

.14 ما الفرق بين الفوتون والإلكترون؟ حدّد إجابتك: اعمل قائمة.

.15 إذا تحرك إلكترون وبروتون بالسرعة نفسها. فأيهما سيمتلك أقصر طول موجي؟ فسّر.

.16 ما الذي يمنع الإلكترونات من الانفلات إلى الفضاء في نموذج رذرفورد الكواكبي للذرة؟

.17 كيف يمكنك أن تعرف ما إذا كان هناك أكسجين قرب سطح الشمس؟

.18 عندما يمرّ طيف ضوئي عريض خلال غاز هيدروجين عند درجة حرارة الغرفة. يلاحظ خطوط امتصاص تعود لسلسلة لايمان فقط. فلِمَ لا نلاحظ السلاسل الأخرى؟

.19 فسّر كيف ترتبط مستويات طاقة الهيدروجين القريبة من بعضها قرب أعلى (الشكل 27 – 27) بالأطياف الخطية القريبة من بعضها عند قمة (الشكل 27 – 22).

.20 هل يمكن أن يكون طول موجة دي برولي "الجسيم" ما أكبر من أبعاد الجسيم ذاته؟ أم أصغر ؟ هل هناك أيّ علاقة مباشرة؟

.21 لذرة هيليوم تحتوي على إلكترونين. هل تعتقد بالمتوسط أنّ الإلكترونين أقرب للنواة بالمقارنة مع نواة ذرة هيدروجين؟ ولماذا؟

.22 كيف يمكن لطيف الهيدروجين أن يحتوي على خطوط كثيرة في حين يحتوي الهيدروجين على إلكترون واحدٍ فقط؟

.23 تُعدّ سلسلة لايمان منيرة أكثر من سلسلة بالمر: لأنّ هذه السلسلة من الانتقالات تنتهي عند أكثر حالة عامة للهيدروجين،الحالة الأرضية. لماذا تمّ إذن اكتشاف سلسلة بالمر أولاً؟

.24 استخدم مبدأ حفظ الزخم لتفسّر سبب امتلاك الفوتونات المنبعثة من الهيدروجين طاقة أقل بقليل من تلك التي تنبأت بها (المعادلة 27 – 10).

.25 دالتا الشغل للصوديوم والسيزيوم هما 2.28 eV و 2.14 eV، على الترتيب. لفوتونات ساقطة ذات تردد محدد. ما هو الفلز الذي سيمنح طاقة حركية أعلى للإلكترونات؟

.26 (أ) هل سيمتلك شعاع من الفوتونات تحت الحمراء دائمًا طاقة أقلّ من شعاع من الفوتونات فوق البنفسجية؟ فسّر. (ب) هل سيمتلك فوتون تحت أحمر وحيد دائما طاقة أقلّ من فوتون فوق بنفسجي وحيد؟

.27 إذا اصطدم ضوء طوله الموجي 450 nm بسطح فلزي. فسيخرج شلال إلكترونات من الفلز. ولكن. إذا اصطدم ضوء له الشدة نفسها. و طوله الموجي 400 nm بالسطح. فهل ستنبعث إلكترونات أكثر؟ هل ستتغير طاقة الالكترونات المنبعثة؟ فسّر.

.28 لنفترض أننا حصلنا على طيف انبعاث للهيدروجين عند درجة حرارة عالية جدًّا (عندما تكون بعض الذرات في الحالات المهيجة). وطيف امتصاص عند درجة حرارة الغرفة. (عندما تكون الذرات جميعها في الحالة الأرضية). هل سيحتوي الطيفان على خطوط متماثلة؟

مسائل

27 – 1 اكتشاف الإلكترون

.1 (I) ما قيمة e/m لجسيم يتحرك في دائرة نصف قطرها 7.0 mm داخل مجال مغناطيسي قيمته 0.86-T إذا جعل مجال كهربائي عمودي شدته 320-V/m المسار مستقيما؟

.2 (II) (أ) ما سرعة شعاع من الإلكترونات يسير دون انحراف عند مروره خلال مجالين متداخلين (متعامدين) كهربائي ومغناطيسي قيمتهما 1.88×10^{4} V/m و 2.90×10^{-3} T، على الترتيب؟ (ب) ما نصف قطر فلك الإلكترون إذا أُلغي المجال الكهربائي؟

.3 (II) تم تحديد كتلة قطرة زيت فوُجدت 2.8×10^{-15} kg. إذا حجزت ساكنة بين لوحين كبيرين تفصلهما مسافة 1.0 cm وفرق الجهد بينهما 340 V. فكم عدد الإلكترونات الزائدة التي تمتلكها هذه القطرة؟

27 – 2 فرضية بلانك الكمية

.4 (I) ما درجة الحرارة التي تحم عندها فلز ما إذا كان أشدّ اشعاع له عند 440 nm؟

.5 (I) قدر قمة الطول الموجي للإشعاع من: (أ) ثلج عند 0°C. (ب) مصباح ضوئي عند 3500 K. (جـ) هيليوم عند 4 K. (د) الكون عند درجةحرارة $T = 2.725$ K، مفترضًا انبعاث جسم أسود. في أيّ منطقة من الطيف EM كلّ منهم؟

.6 (I) (أ) ما درجة الحرارة إذا كانت قمة الطيف لجسم أسود هي 18.0 nm؟ (ب) ما الطول الموجي عند قمة طيف جسم أسود إذا كانت درجة حرارة الجسم عند 2000 K؟

.7 (I) يهتزُّ جُزيء HCl بتردّد طبيعي 8.1×10^{13} Hz. ما الفرق في الطاقة (بالجول والإلكترون فولت) بين القيم الممكنة لطاقة التذبذب؟

.8 (II) ارتفاع الدرجات في سُلّمٍ كبيرٍ هو 20.0 cm (رأسيًا). إذا وقف شخص كتلته 68.0-kg وقدماه على الدرجة نفسها . فما طاقة الجاذبية المختزنة لهذا الشخص بالنسبة إلى الأرض عند: (أ) الدرجةالأولى؟ (ب) الدرجة الثانية.؟ (جـ) الدرجة الثالثة؟ (د) الدرجة n^{th}؟ (هـ) ما التغير في الطاقة الناجمة عن نزول الشخص من الدرجة السادسة إلى الثانية؟

.9 (II) قدّر أعلى طول موجي للضوء الناتج من بؤبؤ عين بشرية (تمثل جسما أسود) مفترضا درجة حرارة الجسم الطبيعية.

27 – 3 و 27 – 4 الفوتونات و الأثر الكهروضوئي

.10 (I) ما طاقة الفوتونات (بالجول) المنبعثة من محطة مذياع FM ترددها 88.5-MHz FM؟

.11 (I) ما مدى الطاقة (بالجول و eV) للفوتونات في الطيف المرئي للطولين الموجيين 400 nm، و 750 nm؟

.12 (I) يمكن لأشعة جاما العادية المنبعثة من نواة ما خلال اضمحلال إشعاعي نشط أن تمتلك طاقة 300 keV. ما طول موجتها؟ هل يمكن أن نتوقع حيودا كبيرا لهذا النوع من الضوء نتيجة مروره خلال فتحة عادية كفتحة باب؟

.13 (I) هناك حاجة إلى حوالي 0.1 eV لكسر "رابطة هيدروجينية" ما في جزيء بروتين. احسب أقل تردد وأطول موجة لفوتون ما يستطيع أن يقوم بذلك.

.14 (I) احسب زخم فوتون ضوء أصفر طول موجته 6.00×10^{-7} m.

.15 (I) ما زخم فوتون أشعة إكس طول موجته $\lambda = 0.010$ nm؟

.16 (II) يمكن لعين الإنسان أن تتجاوب مع قدر ضئيل جدّا من الطاقة الضوئية تصل إلى 10^{-18} J. كم عدد الفوتونات التي تؤدي إلى ملاحظة لمحة عند طول موجي 550 nm قرب قمة المنطقة المرئية الحسّاسة؟

.17 (II) ما أقلّ تردد ضوء لازم لقذف إلكترونات من فلز شغل دالته 4.3×10^{-19} J؟

.18 (II) ما أطول موجة - ضوء تعمل على انبعاث إلكترونات من فلز شغل دالته 3.10 eV؟

.19 (II) دوال الشغل لكلّ من الصوديوم، والسيزيوم، والنحاس ، والحديد هي: 2.3 ، و 2.1 ، و 4.7 ، و 4.5 eV على الترتيب. أيّ من هذه الفلزات لن ينبعث منه إلكترونات عندما يُسلّط الضّوء المرئيّ عليه؟

.20 (II) في تجربة الأثر الكهروضوئي، تمّ ملاحظة عدم انسياب أيّ تيار إلا إذا كان الطول الموجي أقلّ من 570 nm. (أ) ما شغل دالة هذه المادة؟ (ب) ما جهد الإيقاف اللازم استخدامه لضوء طوله الموجي 400 nm؟

.21 (II) ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة من الباريوم ($W_0 = 2.48$ eV) عند إضاءته بضوء أبيض $\lambda = 400$ إلى 750 nm؟

.22 (II) يمتلك الباريوم شغل دالة مقداره 2.48 eV. ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات الناتجة من تسليط ضوء فوق بنفسجي على فلز طوله الموجي 365 nm؟ ما سرعة الإلكترونات؟

.23 (II) عندما يقع ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي 285 nm على سطح فلز فإنّ الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة هي 1.40 eV. ما شغل الدالة لهذا الفلز؟

.24 (II) طول موجة العتبة لانبعاث الإلكترونات من سطح ما هو 350 nm. ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة عندما يتغير الطول الموجي إلى (أ) 280 nm ؟ (ب) 360 nm؟

.25 (II) نوع معين من الأغشية حسّاس فقط لضوء طول موجته أقلّ من 660 nm. ما الطاقة (eV و kcal/mol) اللازمة لحدوث التفاعل الكيميائي الذي يسبب تغير الغشاء؟

.26 (II) عند سقوط ضوء طوله الموجي 230-nm على فلز فإنّ التيار المار خلال الدارة الكهروضوئية (الشكل 27 – 6) جُعِلَ صفرًا عند جهد الإيقاف 1.64 V. فما شغل دالة هذا الفلز؟

.27 (II) في تجربة كهروضوئية باستخدام سطح صوديوم نظيف، تم قياس أعلى طاقة للفوتونات المنبعثة لعدد من الترددات الساقطة المختلفة، وكانت النتائج كما يلي:

التّردّد (10^{14} Hz)	الطّاقة (eV)
11.8	2.60
10.6	2.11
9.9	1.81
9.1	1.47
8.2	1.10
6.9	0.57

ارسم مخطّطًا لهذه النتائج، وأوجد: (أ) ثابت بلانك. (ب) تردد القطع للصوديوم. (د) شغل الدالة.

.28 (II) أثبت أنّ الطاقة E (بالإلكترون فولت) لفوتون طوله الموجي λ (nm) تعطى كالتالي:

$$E = \frac{1.240 \times 10^{3}\ \text{eV}\cdot\text{nm}}{\lambda\ (\text{nm})}$$

*27–5 أثر كمبتون

***29** (II). الكمية h/m_0c ، لها أبعاد طول تدعى طول موجة كومبتون. حدّد طول موجة كومبتون لـكلّ من: (أ) إلكترون. (ب) بروتون. وأثبت أنّه إذا امتلك فوتون طولًا موجيًّا مساويًا لطول موجة كومبتون لجسم ما، فإنّ طاقة الفوتون تساوي الطاقة السكونية للجسم.

***30** (II) استطارت أشعة إكس طول موجتها $\lambda = 0.120$ nm من كربون . فما الانزياح في طول موجة كومبتون لفوتونات قيست (بالنسبة إلى الشعاع الساقط) عند الزوايا : (أ) °45؟ (ب) °90؟ (جـ) °180؟

***31** (III) في تأثير كومبتون، فوتون 0.100-nm يصطدم بإلكترون حُرٍّ في تصادم مباشر ويطرده إلى الأمام. ويعود الفوتون المرتد مباشرة نحو الخلف. استخدم حفظ الطاقة (النسبوية) والزخم لتحدّد : (أ) طاقة الإلكترون الحركية. (ب) طول موجة الفوتون المرتد. (ملحوظة: استخدم المعادلة 27 – 6، وليس المعادلة 27 – 7).

27 - 6 انتاج الثنائيات

.32 (I) ما مقدار الطاقة الحركية الكلية التي سيمتلكها ثنائي إلكترون–بوزيترون إذا انتجها فوتون 3.84-MeV؟

.33 (II) ما أطول طول موجة فوتون قادر على إنتاج ثنائي بروتون – مضاد بروتون؟ (كتلة كلّ منهما 1.67×10^{-27} kg).

.34 (II) ما أقلّ طاقة فوتون لازمة لإنتاج ثنائي $\mu^{+} - \mu^{-}$؟ كتلة كلّ μ (ميون) هي 207 أضعاف كتلة الإلكترون. كم يبلغ الطول الموجي لفوتون من هذا النوع؟

.35 (II) يتحرك كلّ من إلكترون وبوزيترون بسرعة 1.0×10^{5} m/s، تصادمًا مباشرًا، فاختفيا وتولّد فوتونان بدلًا منهما، لكلّ منهما الطاقة نفسها والزخم ذاته، ويتحركان في اتجاهين متعاكسين. كم تبلغ طاقة كلّ فوتون وزخمه ؟

.36 (II) أنتج فوتون أشعة جاما ثنائيًا (إلكترون– بوزيترون). يمتلك كلّ منهما طاقة حركية مقدارها 245 keV. كم كانت طاقة موجة الفوتون وطولها ؟

27 –8 الطبيعة الموجية للمادة

.37 (I) احسب الطول الموجي لكرة 0.23-kg تنتقل بسرعة 0.10 m/s.

.38 (I) حدّد الطول الموجي لنيوترون ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) ينتقل بسرعة 6.5×10^{4} m/s ؟

.39 (I) ما فرق الجهد بالفولت اللازم لتسارع الإلكترون خلاله للوصول إلى طول موجيّ 0.24 nm؟

.40 (II) احسب نسبة طاقة الإلكترون الحركية إلى طاقة البروتون الحركية عند تساوي طول موجتيهما؟

.41 (II) طول موجة دي برولي لإلكترون ما هي $\lambda = 5.0 \times 10^{-10}$ m. (أ) ما مقدار زخمه؟ (ب) ما سرعته؟ (جـ) كم تبلغ الفولتية اللازمة لتسريعه إلى هذه السرعة؟

.42 (II) ما طول موجة إلكترون طاقته: (أ) 10 eV؟ (ب) 100 eV؟ (جـ) 1.0 keV؟

.43 (II) أثبت أنّه إذا امتلك إلكترون وبروتون الطاقة الحركية غير النسبوية نفسها ، فإنّ البروتون سيمتلك الطول الموجي الأقصر.

.44 (II) احسب طول موجة دي برولي لإلكترون في أنبوب صور تلفازك إذا تم تسريعه بوساطة 30,000 V. هل هي نسبوية؟ كيف يمكن مقارنة طول موجته مع حجم "عنق" الأنبوب، 5 cm تقريبًا؟ هل يجب أن نقلق بشأن مشكلات حيود تجعل الصور غير واضحة على الشاشة؟

.45 (III) كتلة سيارة فيراري 1400 kg. تقترب من جسر طريقٍ حُرٍّ عرضه 10 m. ما السرعة اللازمة للسيارة أن تسير بها كي تمتلك طولا موجيا بحيث، ربما بطريقة ما "تحيد" بعد مرورها من هذا "الشّقّ الأحاديّ"؟ كيف يمكن مقارنة هذه الظروف مع السرعات العادية على الطريق الحرّ 30 m/s؟

* 27– 9 المجهر الإلكترونيّ

***.46** (II) ما الجهد الضروري لانتاج طول موجي لإلكترون مقداره 0.20 nm؟ (افرض أنّ الإلكترونات غير نسبوية).

***.47** (II) إذا سُرعت إلكترونات بوساطة 2450 V في مجهر إلكتروني، فما هو أعلى تحليل ممكن؟

27 – 12 نموذج بور

.48 (I) لأجل الانتقالات الهيدروجينية الثلاثة المشار إليها في الأسفل، وتمثل n الحالة الابتدائية، و n' الحالة النهائية، فهل يعدّ الانتقال امتصاصا أم انبعاثا؟ أيهما أعلى، طاقة الحالة الابتدائية أم طاقة الحالة النهائية للذرة؟ وأخيرا، أيّ من هذه الانتقالات يتعلق بأكبر طاقة فوتون؟ (أ) $n = 1$ و $n' = 3$. (ب) $n = 6$ و $n' = 2$. (جـ) $n = 4$ و $n' = 5$.

.49 (I) ما مقدار الطاقة اللازم لتأيين ذرة هيدروجين في الحالة $n = 2$؟

.50 (I) مع أيّ انتقال يتفق ثالث أطول طول موجي في سلسلة باشن في الهيدروجين (الشكل 27 – 27)؟

.51 (I) احسب طاقة التأين لليثيوم ثنائي التأين، Li^{2+}، إذا كانت $Z = 3$.

.52 (I) (أ) حدّد الطول الموجي لخط بالمر الثاني (الانتقال من $n = 4$ إلى $n = 2$) باستخدام (الشكل 27 – 27). حدّد بالمثل كلّا من: (ب) الطّول الموجيّ لخط لايمان الثاني. (جـ) الطّول الموجيّ لخط بالمر الثالث.

.53 (I) قيّم ثابت ردبيرغ R باستخدام نظرية بور (قارن المعادلتين 27 – 9 و 27 – 16) وأثبت أنّ قيمته هي $R = 1.0974 \times 10^{7}\ m^{-1}$.

.54 (II) ما أطول طول موجيّ لضوء قادر على تأيين ذرة هيدروجين في الحالة الأرضية؟

.55 (II) ما الطول الموجي اللازم لفوتون لتأيين هيدروجين في الحالة الأرضية وإعطاء الإلكترون المقذوف طاقة حركية مقدارها 10.0 eV ؟

.56 (II) داخل الشمس، تقوم ذرة هيليوم مؤينة (He^{+}) بالانتقال من الحالة $n = 6$ إلى الحالة $n = 2$، باعثة فوتونا. هل يمكن لهذا الفوتون أن يمتص بوساطة ذرات الهيدروجين الموجودة في الشمس؟ وإذا أمكن ذلك، فما مستويات الطاقة التي ستقفز ذرة الهيدروجين بينها؟

.57 (II) شكّل مخطط مستوى – طاقة لأيون He^{+} (انظر الشكل 27 – 27).

.58 (II) شكّل مخطط مستوى – طاقة لليثيوم ثنائي التأين، Li^{2+}.

.59 (II) ما الطاقتان المختزنة والحركية لإلكترون في الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين؟

.60 (II) مبدئيا، يمكن لغيمة ذرة هيدروجين مثارة أن تمتلك نصف قطر 1.00 mm. ما قيمة n المحتملة لفلك بور بهذا الحجم؟ ما طاقته المحتملة؟

.61 (II) هل تمّ تبرير استخدام الصيغ غير النسبوية في ذرة بور؟ للتحقق، احسب سرعة الإلكترون v بدلالة c للحالة الأرضية للهيدروجين. ثم احسب $\sqrt{1 - v^2/c^2}$

.62 (III) لنفترض أنّ إلكترونًا كان مرتبطًا ببروتون، كما في ذرة الهيدروجين، ولكن بوساطة قوة الجذب بدلا من القوة الكهربائية . فما مقدار نصف القطر و الطاقة عند ذلك للفلك الأول لبور؟

27 – 13 فرضية دي برولي مطبقة على الذرات

.63 (III) افرض أنّ جسما كتلته m محتجزا في بعد واحد في صندوق عرضه L. وحسب النظرية الكمية، فإنّ موجة الجسم (مع $\lambda = h/mv$) هي موجة عرضية مع عقدتين عند طرفي الصندوق. (أ) أظهر أنظمة الاهتزاز على مخطط. (ب) أثبت أنّ طاقة الجسم الحركية مكمية وتعطى كالتالي: $KE = n^2h^2/8mL^2$، وتمثل n عددا صحيحا. (جـ) احسب طاقة الحالة الأرضية ($n = 1$) لإلكترون محجوز في صندوق عرضه 0.50×10^{-10} m. (د) ما طاقة الحالة الأرضية وسرعة كرة بيسبول ($m = 140$ g) في صندوق عرضه 0.50 m؟ (هـ) يمتلك إلكترون محجوز في صندوق طاقة حالة استقرار قدرها 22 eV. ما عرض الصندوق؟

مسائل عامة

.64 تنصّ نظرية الانفجار الكبير على أنّ بداية الكون صاحبها ازدياد هائل في الفوتونات. ولا تزال هذه الفوتونات موجودة إلى يومنا هذا، وتشكل ما يُدعى إشعاعات مايكروويف الخلفية الكونية. ويشع الكون مثل جسم أسود درجة حرارته 2.7 K. احسب طول موجة قمة هذه الإشعاعات.

.65 عند درجات الحرارة المنخفضة، ستكون الذرات في غاز الهيدروجين جميعها في الحالة الأرضية تقريبا. ما هو الفوتون صاحب أقل تردد اللازم لملاحظة الأثر الكهروضوئي؟

.66 استطار شعاع من الإلكترونات 85-eV من بلورة، كما في حيود أشعة إكس، ولوحظت قمة الترتيب –الأول عند $\theta = 38°$. ما مقدار المسافة بين السطوح في بلورة الحيود؟ (انظر البند 25 – 11).

.67 يستطيع فرن مايكروويف أن ينتج إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا عند $\lambda = 12.2$ cm وينتج قدرة مقدارها 760 W. احسب عدد فوتونات المايكروويف المنتجة بوساطة فرن المايكروويف لكلّ ثانية.

68. تعادل شدة ضوء الشمس الذي يصل سطح الأرض حوالي $1000\ W/m^2$. قدّر عدد الفوتونات في هذه الحالة لكلّ متر مربع لكلّ ثانية. خذ متوسط الطول الموجي على أنّه 550 nm.

69. شعاع ضوء ليزر أحمر ($\lambda = 633\ nm$) يصدم حائطا أسود ويمتص بالكامل. إذا أثر هذا الضوء بقوة كلية $F = 5.5\ nN$ في الحائط، فكم عدد الفوتونات التي تصطدم بالحائط لكلّ ثانية ؟

70. مصباح ضوئي قدرته 100-W يبعث 3.0% من الطاقة المدخلة كضوء مرئي (متوسط الطول الموجي 550 nm) بانتظام في الاتجاهات جميعها . قدّر عدد الفوتونات لكلّ ثانية من الضوء المرئي التي ستصطدم ببؤبؤ عين مراقب (قطره 4.0 mm) يقف على بعد 1.0 km.

71. يصطدم إلكترون وبوزيترون تصادمًا مباشرًا، فيلغي كلٌّ منهما الآخر، ويتشكل فوتونان (طاقة كلّ منهما 0.90-MeV) ينتقلان في اتجاهين متعاكسين. كم كانت الطاقة الحركية لكلّ من الإلكترون والبوزيترون؟

72. ما فرق الجهد اللازم لتسريع (أ) بروتون $(m = 1.67 \times 10^{-27}\ kg)$ (ب) إلكترون $(m = 9.11 \times 10^{-31}\ kg)$ لكي يمتلكا طولا موجيًا $\lambda = 5.0 \times 10^{-12}\ m$؟

73. في بعض تجارب رذرفورد (الشكل 27 – 18)، امتلكت جسيمات α $(m = 6.64 \times 10^{-27}\ kg)$ طاقة حركية مقدارها 4.8 MeV. ما أقرب مسافة تستطيع أن تصلها من نواة الذهب (الشحنة $= +79e$)؟ أهمل الحركة الارتدادية للنواة.

74. ما نسبة النقص في كتلة ذرة H عندما تنتقل من $n = 3$ إلى $n = 1$؟

75. احسب النسبة بين قوتي الجاذبية والكهربائية لإلكترون في ذرة هيدروجين. هل يمكن إهمال قوة الجاذبية بأمان؟

76. مرّت إلكترونات سُرّعت بوساطة فرق جهد 12.3 V من خلال غاز يتكون من ذرات الهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة. ما أطوال أمواج الضوء المنبعث نتيجة ذلك؟

77. في تجربة كهروضوئية معينة، تمّ قياس جهد إيقاف مقداره 2.10 V فولت عند سقوط ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي 290 nm على الفلز. باستخدام الجهاز نفسه، ما قيمة جهد الايقاف الجديد الذي سينتج إذا استخدم ضوء أزرق طوله الموجي 440 nm بدلا من فوق البنفسجي؟

78. في أنبوب أشعة إكس (انظر الشكل 25 – 35 والنقاش في البند 25 – 11)، فرق الجهد العالي بين الفتيلة والهدف هو V. وبعد تسريع الإلكترون خلال هذه الفولتية، يصطدم بالهدف فيتباطأ (بوساطة الأنوية موجبة الشحنة) وينبعث فوتون أو أكثر من فوتونات أشعة إكس خلال العملية. (أ) أثبت أنّ الفوتون ذو أقصر طول موجي سيمتلك

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

(ب) ما أقصر طول موجي لأشعة إكس المنبعثة والناجمة من اصطدام الإلكترونات المسرعة بوجه أنبوب صور تلفاز جهده 30-kV ؟

79. تبلغ شدة ضوء الشمس بالقرب من الأرض حوالي $1000\ W/m^2$. تخيل سفينة فضاء مع شراع مربع عاكس للضوء بطول 1.0 km. قدر مقدار الدفع (بالنيوتن) الذي ستشعر به هذه السفينة الناتج من التصادمات مع الفوتونات الشمسية. [مساعدة: افرض أنّ الفوتونات ترتد عن الشراع دون تغيير في قيمة زخمها].

80. ضوء طوله الموجي 300 nm يصطدم بفلز شغل دالته 2.2 eV. ما أقصر طول موجة لدي برولي للإلكترونات المنتجة كإلكترونات ضوئية؟

81. تسقط فوتونات طاقتها 6.0 eV على فلز. فيبدأ تيارٌ بالانسياب من الفلز إلى أن يُطبّق جهد إيقاف قدره 4.0 V. إذا ضوعف الطول الموجي للفوتونات الساقطة، فما أعلى طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة؟ وماذا سيحدث عند مضاعفة الطول الموجي للفوتونات الساقطة ثلاث مرات؟

82. ضوء مرئي ساقط على محززة حيود فتحة شقها 0.010 mm. أوّل أعلى قمة تسببها المحززة تصنع زاوية $3.5°$ مع القمة الوسطى. إذا أمكن تحييد الإلكترونات بوساطة المحززة نفسها، فكم ستكون سرعة الإلكترون التي ستنتج نمط الحيود نفسه الذي ينتجه الضوء المرئي؟

83. (أ) افرض أنّ لعنصر مجهول طيف امتصاص بخطوط عند 2.5 و 4.7 و 5.1 eV فوق الحالة الأرضية، وطاقة تأين مقدارها 11.5 eV. ارسم مخطط مستوى طاقة لهذا العنصر. (ب) إذا امتص 5.1-eV فوتون بوساطة ذرة من هذه المادة، ففي أيّ حالة كانت الذرة قبل امتصاص الفوتون؟ وما هي طاقات الفوتونات التي يمكن انبعاثها لاحقا من هذه الذرة؟

84. ضوء طوله الموجي 424 nm يسقط على فلز شغل دالته 2.28 eV. (أ) ما مقدار الفولتية اللازم تطبيقها لأخذ التيار إلى الصفر؟ (ب) ما مقدار أعلى سرعة للإلكترونات المنبعثة؟ (جـ) ما طول موجة دي برولي لهذه الإلكترونات؟

85. حقن إلكترون تم تسريعه من السكون بوساطة فرق جهد مقدار 96-V إلى داخل مجال مغناطيسي قيمته $3.67 \times 10^{-4}\ T$ لينتقل في دائرة قطرها 18-cm. احسب e/m من هذه المعلومات.

86. قدّر عدد الفوتونات المنبعثة من الشمس خلال عام كامل. (خذ متوسط الطول الموجي ليكون 550 nm وشدة ضوء الشمس الواصلة إلى الأرض (الجو الخارجي) لتكون $1350\ W/m^2$).

87. طبق فرضيات بور على نظام الأرض – القمر لتحسب الطاقات المسموحة وأنصاف أقطار الحركة. آخذا بالحسبان المسافة المعروفة بين الشمس والقمر، هل تكمية الطاقة ونصف القطر ظاهران؟

إجابة التمارين

أ : $\lambda_p = 725\ nm$، لذلك أحمر.

ب : أكثر 1000-nm فوتونات (تردد أقل).

جـ : $5.50 \times 10^{14}\ Hz$ و 545 nm.

د : λ فقط.

هـ : تقل.



إنّ أنبوبَ التفريغ (النيون) هو أنبوبٌ زجاجيّ رقيقٌ مملوءٌ بغاز النيون (أو غاز آخر) يتوهّج بلون معيّن كلّما مرّ خلالَه تيارٌ ذو فولتية عالية. ينبعث ضوءٌ (فوتونات). تكون أطواله الموجية (ألوانه) مميزة لنوع ذرات الغاز المهيجة (المثارة) إلى مستويات طاقة مرتفعة. عندما تفقد جزءا من طاقتها لتعود إلى مستويات الطاقة المنخفضة

في هذا الفصل، سندرس ما تفيدنا به الميكانيكا الكمية عن الذرات، ومستويات الطاقة، وتأثير مبدأ الاستبعاد.

الفصل 28

الميكانيكا الذرية للذرات

مَنَحَنا نموذج بور للذرة صورة أولية (على الرغم من كونها غير دقيقة) لما هي عليه. واقترح تفسيرات لأسباب انبعاث الضوء وامتصاصه بواسطة الذرات عند أطوال أمواج محدّدة. إنّ أطوال أمواج الأطياف الخطية وطاقة التأين للهيدروجين (والأيونات أحادية الإلكترون) في توافق تامّ مع النتائج العملية. ومع هذا، فقد أخفقت نظرية بور في تفسير بعض الظواهر المهمة. فلم تكن قادرة مثلًا على التنبؤ بالأطياف الخطية للذرات المعقدة – ولا حتى لذرة الهيليوم المتعادلة التي تمتلك إلكترونين فقط. كما لم تكن قادرة أيضا على تفسير خطوط الانبعاث التي عند النظر إليها بدقة كبيرة، يكتشف أنها تتكون من خطّين أو أكثر من الخطوط القريبة جدّا من بعضها (والمشار إليها بالتركيب الدقيق). ولم تفسّر نظرية بور أيضًا السبب وراء كون بعض الأطياف الضوئية أكثر لمعانا من غيرها. إضافة إلى عدم استطاعتها تفسير ترابط الذرات في الجزيئات أو المواد الصلبة والسائلة.

ومن وجهة النظر الافتراضية، كذلك، فلم تكن نظرية بور مرضية؛ لأنها كانت دمجا غريبا بين الأفكار التقليدية والكمّية. زِدْ على ذلك، أنّ طبيعة الضوء المزدوجة الموجة – الجسيم لم تحَلّ فعليّا.

لقد ذكرنا قصور نظرية بور هنا ليس استخفافا بها- فهي علامة فاصلة في تاريخ العلم-. ولكننا نفعل ذلك لنبيّن لماذا أصبحت الحاجة ملحة وأكثر وضوحا في بداية عشرينيات القرن العشرين (1920s) إلى نظرية جديدة، أكثر شمولية.



الشكل 28 – 1 إروين شرودينجر مع لايز ما يتنر(انظر الفصل 31).



الشكل 28 – 2 ويرنرهايزنبيرغ (وسط) على بحيرة كومو مع وولفجانج باولي (يمين) و إنريكو فيرمي (يسار).

ولم يمض زمنٌ طويلٌ حتى ظهرت نظرية جديدة. فبعد أقل من عامين من إفصاح دي برولي عن فرضيته المادة – الموجة، طوّرَ إروين شرودينجر (1887 – 1561، الشكل 28 – 1) وفارنرهيزنبوج (1901 – 1976، الشكل 28 – 2) نظرية جديدة وشاملة بشكلٍ مستقلٍّ.

1-28 الميكانيكا الكمية – نظرية جديدة

إنّ النظرية الجديدة التي تعرف **بميكانيكا الكم** ناجحة إلى درجةٍ هائلة. وهي توحّدُ ازدواجية الموجة – والجسيم في نظرية متماسكة وحيدة تعاملت بطريقة ناجحة مع الأطياف المنبعثة من الذرات المعقدة، وحتى لأدق التفاصيل. وفسّرت البريق النسبي للأطياف الخطية، وكيفية تشكل الذرات والجزيئات. وتعدّ أيضا نظرية شاملة تغطي الظواهر الكمية جميعها من إشعاع الجسم الأسود إلى الذرات والجزيئات. كما أنها فسّرت مدى واسعا من الظواهر الطبيعية، ونتج من تنبؤاتها أجهزة عملية كثيرة جديدة. وبالفعل، ونتيجة لنجاحها الباهر، فهي مقبولة في يومنا هذا تقريبا من الفيزيائيين جميعهم على أنها النظرية الأساس وراء العمليات الفيزيائية جميعها.

تتعامل الميكانيكا الكمية بصورة رئيسة مع العالم الجاهري للذرات والضوء. ولكن عندما تطبق هذه النظرية الجديدة على الظواهر دون الجهرية، فمن المفترض أن تكون قادرة على تحقيق القوانين التقليدية القديمة.وهذا هو **مبدأ التوافق** (ذكر سابقا في البند 27 – 12)، الذي تحقق وبشكل كامل بواسطة الميكانيكا الكمية. مبدأ التوافق

وهذا لا يعني الاستغناء تمامًا عن النظريات التقليدية كقوانين نيوتن. وفي عالمنا اليومي، من الأسهل تطبيق النظريات التقليدية التي تعطي أوصافا دقيقة إلى درجة كافية. ولكن عندما نتعامل مع سرعات عالية قريبة من سرعة الضوء، فيجب أن نستخدم نظرية النسبية. ولكن عندما نتعامل مع العالم الضئيل للذرة، فعلينا استخدام الميكانيكا الكمية.

وعلى الرغم من أننا لن نخوض في التفاصيل الرياضية للميكانيكا الكمية، إلا أننا سنناقش أفكارها الرئيسة، وكيفية توظيفها لخصائص المادة الموجية والجسيمية لتفسير التركيب الذري والتطبيقات الأخرى.

2-28 الدالة الموجيّة وتفسيرها. تجربة الشّقّ المزدوج

إنّ الخصائص المهمة لأيّ موجة هي الطول الموجي، والتردد، والاتساع. ولموجة كهرومغناطيسية، يحدد التردد (أو الطول الموجي) ما إذا كان الضوء في منطقة الطيف المرئي أم لا. وإذا كان كذلك، فما لونه؟ وكذلك رأينا أنّ التردد هو مقياس طاقة الفوتون المعني ($E = hf$). واتساع الموجة الكهرومغناطيسية أو إزاحتها عند أيّ نقطة هو شدة المجال الكهربائي (أو المغناطيسي) عند تلك النقطة، وهو مرتبط بشدة الموجة (بريق الضوء).

وللجسيمات المادية كالإلكترونات، تربط الميكانيكا الكمية الطول الموجي بالزخم حسب صيغة دي برولي، $\lambda = h/p$ (المعادلة $27-8$). ولكن، ما الذي يناظر اتساع الموجة المادية أو إزاحتها؟ يمثّل اتساع موجة كهرومغناطيسية بالمجالين الكهربائي والمغناطيسي؛ E، و B. وفي الميكانيكا الكمية، تؤدي الدالة الموجية هذا الدور، والذي أعطي الرمز Ψ (الحرف اليوناني الكبير بساي والذي يلفظ "ساي"). وبذلك تمثل Ψ الإزاحة الموجية، كدالة في الزمن والموضع، لنوع مجال جديد والذي قد نسميه مجالا "ماديا" أو موجة مادية.

دالة موجي

ولنفهم كيف نفسّر الدالة الموجي Ψ؛ نعمل مناظرة مع الضوء، ونستخدم ازدواجية الضوء – الجسيم.

ورأينا في (الفصل 11) أنّ الشدة I لأيّ موجة تتناسب مع مربع الاتساع. ويبقى هذا صحيحًا للأمواج الضوئية أيضا، كما رأينا في (الفصل 22). أيّ أنّ

$$I \propto E^2$$

حيث تمثل E شدة المجال الكهربائي. ومن وجهة نظر الجسيم، تتناسب شدة شعاع الضوء (بالتردد المعطى) مع عدد الفوتونات، N، التي تمر خلال مساحة معينة لكلّ وحدة زمن. وكلما ازداد عدد الفوتونات، ازدادت الشدة. لذا، فإنّ

$$I \propto E^2 \propto N.$$

ويمكن لهذا التناسب أن يُنظر إليه من الاتجاه الآخر، فنحصل على

$$N \propto E^2$$

أيّ أنّ عدد الفوتونات (ولنقل المصطدمة بصفحة في هذا الكتاب) يتناسب مع مربع شدة المجال الكهربائي. وإذا كان الشعاع الضوئي ضعيفا، يكون عدد الفوتونات المشاركة قليلاً. وبالفعل، من الممكن "بناء" صورة في آلة تصوير ما باستخدام ضوء ضعيف جداً لِيُشاهَدَ أثرُ كلّ فوتون على حدة. وإذا كنا نتعامل مع فوتون وحيد، يصبح تفسير العلاقة السابقة ($N \propto E^2$) بطريقة مختلفة قليلاً. وعند أيّ نقطة، يكون مربع شدة المجال الكهربائي، E^2، هو مقياس احتمالية وجود الفوتون عند ذلك الموقع. وعند النقاط حيث تكون E^2 كبيرة، هناك احتمالية كبيرة أن يكون الفوتون في ذلك الموقع. ولكن عندما تكون E^2 صغيرة، فإنّ الاحتمالية أيضا صغيرة.

ونستطيع تفسير أمواج المادة بالطريقة نفسها، كما اقترحها بدايةً ماكس بورن (1882 – 1970) في عام 1927. ويمكن أن يختلف الدالة الموجية Ψ في القيمة من نقطة إلى أخرى في المكان والزمان. وإذا كانت Ψ تصف تجمّعا من الإلكترونات الكثيرة، فعندئذ ستتناسب Ψ^2 عند أيّ نقطة مع عدد الإلكترونات المتوقع وجودها عند تلك النقطة. ولكن عند التعامل مع أعداد قليلة من الإلكترونات، فلا يمكننا التنبؤ بدقة عالية، وعليه، فإنّ Ψ^2 تأخذ الخصائص الاحتمالية. وإذا مثلت Ψ التي تعتمد على الزمان والمكان إلكترونا وحيدًا (ولنقل في ذرة ما)، فعندها نفسّر Ψ^2 كالتالي: *تمثل Ψ^2 عند نقطة معنية في الفضاء والزمان احتمالية العثور على الإلكترون عند المكان والزمن المحددين.*

احتمالية $\Psi^2 \propto$

تجربة تداخل الشّقّ - المزدوج للإلكترونات

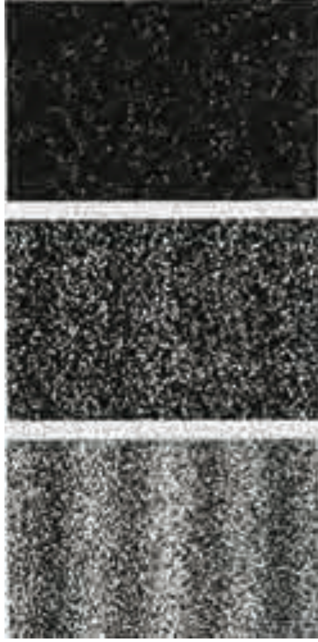
لفهم هذا بصورة أفضل؛ نأخذ كتجربة فكرية تجربة الشّقّ المزدوج المألوفة، ونستعرضها لكلّ من الضوء والإلكترونات.

وسنأخذ بالحسبان شقين حجمهما والمسافة الفاصلة بينهما بمستوى الطول الموجي نفسه لأيّ شيء نوجهه إليهما، سواء كان شعاعا أو إلكترونات (الشكل $28-3$). ونحن على اطلاع جيد بما قد يحدث في هذه الحالة مع الضوء، على اعتبار أنّ هذه هي تجربة الشّقّ المزدوج ليونغ (البند $24-3$)؛ يمكن أن يشاهد نمط التداخل على شاشة خلفية. وإذا استعضنا عن الضوء بالكترونات إلكترونات طولها الموجي قريب من حجم الشق بدلا من الضّوء، فستنتج هي أيضا نمط تداخل (تذكر الشكل $27-12$). وفي حالة الضوء، سيكون النمط مرئيّا للعين المجردة مع إمكانية تسجيله على شريط سينمائي. أمّا للإلكترونات، فيمكن استخدام شاشة متلألئة (لتتوهج عند موضع اصطدام الإلكترونات بها).

الشكل 28 – 3 شعاع ضوئي أو إلكتروني متواز يسقط على شقين حجمهما يقترب من الطول الموجي. ويلاحظ نمط تداخل.



وإذا خفضنا انسياب الإلكترونات (أو الفوتونات) إلى الدرجة التي يمرّ بها إلكترون (أو فوتون) واحد تلو الآخر فقط من خلال الشقين، فسنرى عندئذٍ وميضا في كلّ مرة يصطدم بها أحد هذه الإلكترونات(أو الفوتونات) بالشاشة. وفي البداية، ستبدو الومضات وكأنها عشوائية. وبالفعل، ليست هناك أيّ طريقة للتنبؤ بمكان اصطدام أيّ إلكترون بالشاشة. وإذا أجرينا التجربة لفترة زمنية طويلة، وتتبعنا أماكن اصطدام الإلكترونات بالشاشة، فسنرى خلال فترة قصيرة نمطًا يتشكل؛ إنّه نمط التداخل الذي تنبأت به النظرية الموجية (انظر الشكل 28 – 4). لذلك، وعلى الرغم من عدم قدرتنا على التنبؤ بموضع اصطدام الإلكترون بالشاشة، إلا أننا نستطيع التنبؤ بالاحتمالات. (ويمكن أن يقال الشيء نفسه عن الفوتونات). الاحتمالية، كما ذكرت من قبل، تتناسب مع Ψ^2. وأينما تكون قيمة Ψ^2 صفرًا، فسنحصل على قيمة صغرى في نمط التداخل. وأينما تكون قيمة Ψ^2 عظمى، فسنحصل على قمة في نمط التداخل. وعندها، سيحدث نمط التداخل حتى وإن مرّت الإلكترونات (أو الفوتونات) خلال الشّقّين واحدا تلو الآخر. وعليه، فإنّ نمط التداخل لن ينجم عن تماس أيّ إلكترون مع أيّ إلكترون آخر. ولكن كأنه ناجٌ من مرور إلكترون واحد من خلال الشقين في اللحظة نفسها ومن ثمّ تداخله مع نفسه. وهذا الاحتمال ممكن؛ لأنّ الإلكترون ليس جسيما بالتحديد. وهو موجة بقدر ما هو جسيم، ويمكن للموجة أن تنتقل خلال شقّين في اللحظة نفسها. ولكن ماذا سيحدث لو أننا أغلقنا أحد الشّقّين لنتأكد من مرور الإلكترون من الشّقّ الآخر، ثم بعد ذلك بقليل أغلقنا الشّقّ الثاني لنتأكد من مرور الإلكترون بداية من الشّقّ الأول؟ ستكون النتيجة أننا لن نرى أيّ تداخل. وبدلاً من ذلك، سنرى منطقتين برّاقتين (أو أنماط حيود) على الشاشة خلف الشّقّين. وهذا يؤكد فكرتنا، لو أنّ الشّقّين كانا مفتوحين، فإنّ الشاشة ستظهر نمط تداخل كما لو أنّ كلّ إلكترون قد مرّ من الشّقّين، مثل موجة ما. ومع هذا، فإنّ كلّ إلكترون سيحدث نقطة صغيرة على الشّاشة كما لو أنه جسيم.



الشكل 28 – 4 تجربة الشق المزدوج ليونج مطبقة باستخدام الإلكترونات. لاحظ أنّ النمط غير ظاهر بوجود عدد قليل فقط من الإلكترونات (الصور العلوية)، ولكن مع عدد أكثر وأكثر من الإلكترونات (الصورتان الثانية والثالثة)، يظهر نمط تداخل الشّقّ المزدوج المألوف (الفصل 24).

إنّ الهدف الأساس من هذا النقاش هو أنّه إذا تعاملنا مع الإلكترونات (أو الجسيمات الأخرى) كما لو أنها موجات، عندها ستمثّل Ψ اتساع الموجة. وإذا تعاملنا معها على أنها جسيمات، فيجب أن نتعامل بناءً على قاعدة I احتمالية. مربع دالة موجية،Ψ^2، يعطي احتمالية إيجاد إلكترون عند نقطة محددة. ولا نستطيع التنبؤ بدقة (أو حتى تتبع) Ψ بمسار إلكترون وحيد خلال المكان والزمان.

3-28 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

عندما تجرى قياسات معملية، فهناك شيء من عدم اليقين. فعلى سبيل المثال، لا يمكنك أن تقيس طول طاولة بدقةٍ مطلقة. وحتى باستخدام مسطرة أصغر تدريج فيها 1 mm، فسيكون هناك عدم دقة ربما يصل إلى $\frac{1}{2}$mm أو ما إلى ذلك. ولكن الآلات التي تمتاز بدقة كبيرة ستنتج أقيسة أكثر دقة. ومع ذلك سيكون هناك دائما عدم يقين مرتبط بالقياسات المعملية، بغض النظر عن مدى جودة أداة القياس. ونتوقع باستخدامنا للآلات الأكثر دقة أن نجعل عدم اليقين في هذه الأقيسة صغيرا لدرجة كبيرة جدًا.

ولكن حسب الميكانيكا الكمية، هناك فعليًا حدود لدقة بعض القياسات. وهذه الحدود ليست محددة بمدى جودة صناعة الآلات، ولكنه متأصل بالطبيعة، وهو ناجٌ من عاملين هما: ازدواجية طبيعة الموجة والجسيم؛ التفاعل الذي لا يمكن تجنبه بين الشيء الملاحَظ والآلة الملاحِظة. والآن، دعنا ننظر إلى هذا بتفصيل أكبر.

من غير الممكن إجراء قياس على جسم ما دون إزعاجه، ولو قليلاً. خذ بالحسبان محاولتك تحديد موضع كرة تنس طاولة في غرفة معتمة تماما. ستبدأ بالتلمس حولك محاولاً إيجاد موضعها، وفي اللحظة التي تلمسها بأصابعك ترتد الكرة مبتعدة. وفي أيّ وقت نقيس موضع أي جسم، سواء كان كرة أو إلكترونا، نقوم بلمسه دائما بشيء آخر ليمنحنا المعلومات عن موضعه. لتحديد موضع كرة تنس طاولة في غرفة معتمة، يمكن أن تتحسس حولك باستخدام يدك أوعصا مثلا، أو يمكنك أن تسلط ضوءا وتقيس الضوء المنعكس عن الكرة. وعندما تبحث بيدك أو بالعصا، فإنك ستجد موضع الكرة عندما تلمسها. ولكن عندما تلمس الكرة، فإنك تصطدم بها بصورة لا يمكن تجنبها، فتمنحها بعض الزخم.

ولذلك لن تعلم موقعها المستقبلي. وبالمثل، ستكون ملاحظتك صحيحة لكرة تنس الطاولة باستخدام الضوء، ولكن بدرجة أقل. ولكي "نرى" الكرة، يجب أن يُستطار فوتونٌ واحدٌ على الأقل منها، ويجب أن يدخل الفوتون المنعكس إلى داخل عينيك أو في أيّ أداة كاشفة أخرى. وعندما يصطدم فوتون بجسم عادي الحجم، فلن يغير من حركة الجسم أو موقعه بصورة ملموسة . ولكن عندما يصطدم فوتون ما بجسيم صغير جدّا مثل الإلكترون، فهو قادر على نقل زخم لهذا الجسيم. وفي هذه الحالة، يغير من حركته وموضعه بصورة ملموسة وبطريقة لا يمكن التنبؤ بها . والعمل المحض لقياس موضع جسم ما في وقت ما يجعل معرفتنا لموضعه المستقبلي غير دقيق.

والآن، سنتناول طريقة عمل ازدواجية الموجة – الجسيم. تخيّل تجربة ذهنية نحاول من خلالها قياس موضع جسيم ما، ولنقل إلكترون ما، باستخدام الفوتونات (الشكل 28 – 5). (سيكون النقاش هو ذاته لو استعملنا مجهرا إلكترونيا بدلًا من ذلك). وكما رأينا في (الفصل 25)، يمكن رؤية الأجسام لدقة تصل في أحسن الأحوال إلى حوالي طول موجة الأشعة المستخدمة. وإذا أردنا قياسًا دقيقًا للموقع، فيجب أن نستخدم طولًا موجيًّا قصيرًا. ولكن الطول الموجي القصير يرتبط بترددٍ عالٍ وزخم كبير $(p = h/\lambda)$. وكلّما ازداد الزخم الذي تمتلكه الفوتونات، ازداد الزخم القادرة على إعطائه للجسيم عند اصطدامها به. وإذا استخدمنا فوتونات ذات أطوال موجية أكبر، وبالتالي زخم أقلّ، فلن تتأثر حركة الجسيم كثيرا عند اصطدام الفوتونات بها. ولكن الطول الموجي الطويل يعني قدرة تحليلية أقل. وعليه، فإنّ موضع الجسم سيُحَدّدُ بدقةٍ أقلّ. وبذلك، فإنّ عملية ملاحظة موضع الجسم تولّد عدم يقين (عدم تحديد) في موضع الإلكترون وزخمه. وهذا جوهر مبدأ عدم اليقين الذي أعلنه في البداية هايزنبيرغ عام 1927.

كميًّا، نستطيع القيام بحسابات تقريبية لقيمة هذا التأثير. وإذا استخدمنا ضوءًا ذا طولٍ موجيّ λ، فعندها يمكننا قياس الموضع بدقة تصل في أحسن الأحوال إلى λ تقريبا. أي أنّ عدم اليقين في قياس الموضع، Δx، تقريبًا هو:

$$\Delta x \approx \lambda$$

ولنفترض أنّ الجسيم يمكن كشفه بواسطة فوتون وحيد. وزخم الفوتون $p_x = h/\lambda$. وعندما يصطدم الفوتون بالجسيم، فإنه سيعطي جزءًا من زخمه (أو كلّه) لهذا الجسيم (الشكل 28 – 5). ونتيجة لذلك، فإنّ مقدار عدم اليقين في الزخم النهائي لهذا الجسيم هو

$$\Delta p_x \approx \frac{h}{\lambda}$$

بسبب عدم قدرتنا على تحديد مقدار الزخم المنتقل مسبقا. وحاصل ضرب حدّيّ عدم اليقين

$$(\Delta x)(\Delta p_x) \approx h$$

ويمكن لحدّيّ عدم اليقين أن يكونا أسوأ من هذا، اعتمادا على الجهاز، وعدد الفوتونات اللازمة للكشف. وتظهر الحسابات المتأنية أنّ حاصل ضرب الحدين هو تقريبًا في أحسن الأحوال.

$$(\Delta x)(\Delta p_x) \gtrsim \frac{h}{2\pi} \quad \textbf{(1-28)}$$

مبدأ عدم اليقين (Δx و Δp)

وهذه العبارة الرياضية هي مبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ، أو كما تدعى في بعض الأوقات مبدأ عدم **التحديد** الذي يخبرنا بأننا لا نستطيع قِياسَ كلّ من الموضع والزخم لجسم ما بدقة في آنٍ معا

وكلّما حاولنا قياس الموضع بدقة أكبر، لتكون Δx صغيرة، كلما كان الشك في الزخم أكبر، Δp_x. وإذا حاولنا قياس الزخم بدقة عالية، فعندئذ يصبح عدم اليقين في الموضع كبيرًا.



الشكل 28 – 5 تجربة فكرية لملاحظة إلكترون باستخدام مجهر ضوئيّ قويّ. وعلى الأقل يجب أن يستطار فوتون واحد من الإلكترون (لينتقل بعض الزخم إليه) ويدخل المجهر.

ولا يحول مبدأ عدم اليقين دون إجراء القياسات الدقيقة المنفصلة (مستقلة). فعلى سبيل المثال، يمكن أن نقيس مبدئيًّا موضع الجسم بالتحديد. ولكن حينها سيكون الزخم غير معروف تمامًا. لذلك، وعلى الرغم من احتمال معرفتنا لموضع الجسم بدقة عالية جدا في لحظة ما، إلا أننا لن نملك أيّ فكرة عن موضعه في اللحظة التالية. وعدم اليقين المعبّر عنه هنا هو صفة متأصلة في الطبيعة، وتعكس أفضل دقة يمكن الحصول عليها نظريا، حتى بوجود أفضل الأجهزة.

تنويه !
عدم اليقين غير ناتج من قصور الأجهزة، ولكنه متأصل في الطبيعة (الموجة – الجسم)

وهناك شكل آخر مفيد لمبدأ عدم اليقين يربط الطاقة بالزمن، ونستطيع اختباره كما يلي: الجسم الذي نرغب في كشفه يملك عدم يقين في موضعه بمقدار $\Delta x \approx \lambda$. والفوتون الذي يكشفه يتحرك بسرعة c، ويستغرق زمنا $\Delta t \approx \Delta x/c \approx \lambda/c$ ليمر خلال مسافة عدم اليقين . وبذلك، يكون عدم اليقين في الزمن المقيس،عندما يكون الجسم في موضع ما حوالي

$$\Delta t \approx \frac{\lambda}{c}$$

وبما أنّ الفوتون يستطيع نقل بعض طاقته أو كلّها $(= hf = hc/\lambda)$ للجسيم، فإنّ شكل طاقة الجسيم نتيجة لذلك هو

$$\Delta E \approx \frac{hc}{\lambda}$$

وحاصل ضرب كميتي عدم اليقين هاتين هو

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx h$$

وتعطي الحسابات المتأنية أكثر

مبدأ عدم اليقين (ΔE و Δt)

$$(\Delta E)(\Delta t) \gtrsim \frac{h}{2\pi} \qquad \textbf{(2 – 28)}$$

ويخبرنا هذا الشكل من مبدأ عدم اليقين أنّ طاقة جسيم ما يمكن أن تكون غير مؤكّدة (أو يمكن تفسيرها على أنها غير محفوظة لوهلة) بمقدار ΔE خلال زمن ما $\Delta t \approx h/(2\pi\ \Delta E)$.

أعطيت الكمية $(h/2\pi)$ التي تظهر كثيرا في الميكانيكا الكمية الرمز h ($\hbar$– بار). أيّ أنّ

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}.$$

وباستخدام هذا الترميز، يمكن كتابة (المعادلتين $28-1$ و $28-2$) لمبدأ عدم اليقين

$$(\Delta E)(\Delta t) \gtrsim \hbar \text{ و } (\Delta x)(\Delta p_x) \gtrsim \hbar$$

لقد ناقشنا موقع الإلكترون وسرعته كما لو أنه جسيم. إلا أنّه ليس كذلك. وبالفعل، فإنّ وجود مبدأ عدم اليقين هو نتيجة لامتلاك الإلكترون – والمادة بشكل عام – خصائص موجية إضافة إلى خصائص جسمية. وما يخبرنا به مبدأ عدم اليقين حقيقة، أنه لو صممنا على أن الإلكترون جسيم ، فإنّ هناك بعض المحُدّدات على هذا المنظر المبسط – وهي، أنّ الموضع والسرعة لا يمكن تحديدهما بدقة في آنٍ واحد. ومع هذا، فلن يمتلك الإلكترون موضعًا وزخمًا دقيقين في الوقت نفسه (لأنه ببساطة ليس جسيمًا). وبالمثل، يمكن أن تمتلك الطاقة مقدارًا من عدم اليقين ΔE خلال فترة زمنية $\Delta t \approx \hbar/\Delta E$.

ولأنّ ثابت بلانك، h، صغيرٌ جدّا، فإنّ الشّكّ المعبّر عنه في مبدأ عدم اليقين عادة يكون مهملًا على المستوى الجاهري. ولكن على مستوى الأحجام الذرية، فإنّ عدم اليقين هائل. ولأننا نسلّم بأنّ الأجسام العادية مكونة من ذرات تحتوي على أنوية وإلكترونات، فإنّ لمبدأ عدم اليقين علاقة مع فهمنا للطبيعة بمجملها. ويُعَبّرُ مبدأ عدم اليقين، وربما بوضوح كبير، عن الطبيعة الاحتمالية للميكانيكا الكمية. ولذلك، فإنه يستخدم عادة في النقاشات الفلسفية.

المثال 28-1 **عدم اليقين في موضع الإلكترون.**

يتحرك إلكترون في خط مستقيم بسرعة ثابتة $v = 1.10 \times 10^6\,\mathrm{m/s}$ مقيسة لدقة 0.10% .
ما أعلى دقة يمكن أن يقاس بها موضعه في الوقت نفسه؟

النّهج: الزخم $p = mv$، وعدم اليقين في p يساوي $\Delta p = 0.0010p$. ويعطينا مبدأ عدم اليقين (المعادلة $28 - 1$) أقلّ Δx باستخدام إشارتي المساواة.

الحلّ: يعطى زخم الإلكترون كالتالي:

$$p = mv = (9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})\cdot(1.10 \times 10^6\,\mathrm{m/s}) = 1.00 \times 10^{-24}\,\mathrm{kg\cdot m/s}$$

عدم اليقين في الزخم 0.10% من هذا، أو $\Delta p = 1.0 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg\cdot m/s}$. ومن مبدأ عدم اليقين، فإنّ أفضل قياس متزامن للموضع سيمتلك عدم يقين مقداره

$$\Delta x \approx \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{1.06 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}}{1.0 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg\cdot m/s}} = 1.1 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$$

أو $110\,\mathrm{nm}$.

ملحوظة : هذا حوالي 1000 مرة ضعف قطر الذرة.

التمرين أ: تمّ قياس موضع إلكترون بدقة مقدارها $0.50 \times 10^{-10}\,\mathrm{m}$. أوجد أقلّ عدم يقين في زخمه وسرعته

المثال 28-2 **عدم اليقين في موضع كرة بيسبول (كرة القاعدة)**

ما هو عدم اليقين في موضع كرة بيسبول، كما فرض بواسطة مبدأ عدم اليقين، إذا كانت كتلتها 150-g وألقيت بسرعة $(93 \pm 2)\,\mathrm{mph} = (42 \pm 1)\,\mathrm{m/s}$؟

النّهج: عدم اليقين في السرعة يساوي $\Delta v = 1\,\mathrm{m/s}$. نضرب Δv في الكتلة m للحصول على Δp، ومن ثم نستخدم مبدأ عدم اليقين لإيجاد Δx.

الحلّ: عدم اليقين في الزخم هو

$$\Delta p = m\,\Delta v = (0.150\,\mathrm{kg})(1\,\mathrm{m/s}) = 0.15\,\mathrm{kg\cdot m/s}$$

ولذلك، فإنّ عدم اليقين في قياس الموضع يمكن أن يكون صغيرًا لدرجة

$$\Delta x = \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{1.06 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}}{0.15\,\mathrm{kg\cdot m/s}} = 7 \times 10^{-34}\,\mathrm{m}$$

ملحوظة : هذه المسافة أصغر بكثير مّا يمكن قياسها وتصورها. وهي أصغر بمقدار بليون بليون مرة من الذرة. وبالفعل، فإنّ مبدأ عدم اليقين لا يضع أيّ حد للأقيسة على المستوى الجاهري للأجسام

* 28-4 الفلسفات الضمنية؛ الاحتمالية مقابل الحتمية

إنّ النظرةَ التقليدية النيوتونية للعالم نظرةٌ حتمية (انظر البند $5 - 9$). وأحد أفكارها الأساسية أنه في حالة تحديد موضع جسم ما وسرعته عند زمن معين، فإنّنا نستطيع التنبُّؤ بموضعه المستقبلي عند معرفة القوة المؤثرة فيه. على سبيل المثال، إذا قذف حجرٌ عدة مرات بالسرعة والزاوية الابتدائيتين نفسيهما، وبقيت القوة المؤثرة فيه هي ذاتها، فإنّ مسار المقذوف سيبقى دائمًا هو نفسه. وإذا عُرفت القوى (الجاذبية وأيّ مقاومة للهواء)، فيمكن التنبؤ بمسار الحجر بدقة. وهذا التصور الحتمي يوحي بأنّ المستقبل المكتشف للكون، والذي افترض أنّه يتكون من أجسام دقيقة، يُعدّ محدّدًا تمامًا.

إنّ هذه النظرة التقليدية الحتمية للعالم الفيزيائي قد تمّ تغييرها جذريًّا بواسطة الميكانيكا الكمية. وكما رأينا في تحليل تجربة الشّقّ المزدوج (البند 28 – 2)، فإنّ الإلكترونات المُحرّرة جميعها بالطريقة نفسها لن تنتهي جميعها في الموضع نفسه. وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ هناك احتمالات معينة قائمة بأنّ الإلكترون سيصل إلى عدة نقاط. وهذا مخالفٌ تمامًا للنظرة التقليدية، والتي يكون فيها مسار الجسم متوقعا بدقة بدلالة سرعته وموضعه الابتدائيين والقوى المؤثرة فيه. وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ موضع الجسيم وسرعته لا يمكن تحديدهما معا بدقة في الوقت نفسه. وهذا ما عُبِّرَ عنه في مبدأ يدعى عدم اليقين، والذي نتج بسبب الكيانات الأساسية، مثل الإلكترونات التي لا يمكن اعتبارها ببساطة جسيمات؛ لأنّ لها خصائص موجية أيضًا. تسمح الميكانيكا الكمية لنا فقط بحساب الاحتمالية*. ولنقل بأنّ إلكترونا (عند التفكير به كجسيم) ستتمّ ملاحظته عند أماكن مختلفة. "والميكانيكا الكمية تقول بأنّ هناك قليلا من عدم اليقين المتأصل في الطبيعة. وهذا مختلف تمامًا عن النظرة الحتمية للميكانيكا التقليدية.

ولأنّ المادة مكونة من ذرات، فمن المتوقع أن تحكم الاحتماليةُ الأجسامَ ذات الحجوم العادية بدلا من الحتمية الصارمة. وعلى سبيل المثال، تتنبأ الميكانيكا الكمية باحتمالية ذات قيمة (ولكنها صغيرة ومهملة) بأنك عندما ترمي حجرا، فإنّ مساره قد ينحني فجأة إلى الأعلى بدلا من اتباع المسار المنحني-إلى الأسفل والمعتاد لحركة مقذوفٍ طبيعي. وتتنبأ الميكانيكا الكمية باحتمالية عالية جدّا بأنّ الأجسام العادية ستتصرف وفقًا لقوانين الفيزياء التقليدية. وتعدّ هذه التنبؤات ذات احتمالية عالية جدا، ولكنها ليست حتمية مطلقة. ويعزى السّبب في تصرف الأجسام الجاهرية حسب القوانين التقليدية مع احتمالية عالية إلى ارتفاع عدد الجزيئات ذات العلاقة؛ عند وجود عددٍ كبير من الأجسام في وضع إحصائي ما، تقترب الانحرافات عن المتوسط (أو الأكثر احتمالا) من الصفر. إنّ التوزيع المتوسط لأعداد الجزيئات الكبيرة التي تتبع ما يُسمّى قوانين الفيزياء التقليدية الثابتة باحتمالية عالية، يعزّز "الحتمية" الظاهرية. لقد لوحظت الانحرافات عن القوانين التقليدية عند التعامل مع أعداد قليلة من الجزيئات. ونستطيع القول عندئذٍ: على الرغم من عدم وجود قوانين حتمية في الميكانيكا الكمية، إلاّ أنّ هناك قوانين تعتمد على الاحتمالية.

ومن المهم ملاحظة أنّ هناك اختلافا بين الاحتمالية المفروضة بواسطة الميكانيكا الكمية وتلك التي استخدمت في القرن التاسع عشر لفهم الديناميكا الحرارية، وتصرفات الغازات بدلالة الجزيئات (الفصلان 13 و 15). وفي الديناميكا الحرارية، استخدمت الاحتمالية بسبب وجود عدد كبير من الأجسام الواجب تتبعها. ومع هذا، فلا يزال يعدّ تحرك الجزيئات وتفاعلها بطريقة حتمية تابعا لقوانين نيوتن. أما الاحتمالية في الميكانيكا الكمية فهي مختلفة تمامًا؛ فهي متأصلة في الطبيعة، وليست محددة لقدراتنا على الحساب أو القياس.

تفسير كوبنهاجن

النظرة المقدمة هنا هي المقبولة بشكل عام، وهي **تفسير كوبنهاجن** للميكانيكا الكمية التي سمّيت بهذا تكريمًا لموطن نيلز بور، لأنها طوّرت بشكل كبير هناك خلال المناقشات بين بور وفيزيائيين مرموقين آخرين.

ولأنّ الإلكترونات ليست ببساطة جسيمات، فلا يمكن التفكير بها على أنّها تتبع مسارات معينة في الفضاء والزمان.

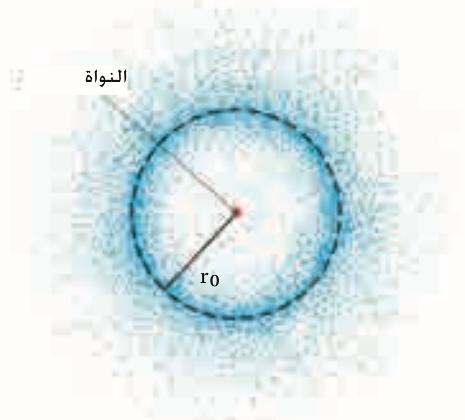
وهذا يقترح أنّ وصف المادة في الفضاء والزمان قد لا يكون صحيحا تماما. وهذا الاستنتاج العميق البعيد المنال كان موضوع نقاش حيوي بين الفلاسفة. وربما كان بور أكثر فيلسوف أهمية وتأثيرا في الميكانيكا الكمية. فقد جادل بأنّ وصف الفضاء والزمان للذرات والإلكترونات الفعلية غير ممكن. ومع هذا، فإنّ وصف التجارب على الذرات أو الإلكترونات يجب أن يعطى بدلالة الفضاء، والزمن، والمبادئ الأخرى المألوفة وفقًا للخبرات العادية، كالأمواج والأجسام. ويجب ألاّ يقودنا وصفنا للتجارب إلى الاعتقاد بأنّ الذرات أو الإلكترونات هي نفسها تتحرك في الفضاء والزمان كأيّ جُسيمات تقليدية.

* لاحظ أنّ هذه الاحتمالات يمكن حسابها بدقة، تمامًا كالتنبؤات المحددة للاحتمالات في النرد أو في لعب الورق. ومع هذا، فهي ليست كالتنبؤات والاحتمالات في الأحداث الرياضية . أو الكوارث التي تحدث في الطبيعة، أو تلك التي يحدثها الإنسان؛ إنّها تقديرات فقط.

5-28 نظرة الميكانيكا الكمية للذرات

في بداية هذا الفصل، ناقشنا محدودية نظرية بور في التركيب الذري. والآن، سنختبر نظرية الميكانيكا الكمية للذرات التي هي أكثر تعقيدا من نظرية بور القديمة. وعلى الرغم من أنّ نظرية بور قد تمّ الاستغناء عنها كوصف دقيق للطبيعة، إلاّ أنّ الميكانيكا الكمية أعادت التأكيد على بعض نواحي النظرية القديمة، كوجود الإلكترونات في الذرّة في حالات منفصلة فقط ذات طاقات محددة، وأنّ الفوتون الضوئي ينبعث (أو يمتص) فقط عند انتقال إلكترون ما من حالة إلى أخرى. ومع هذا، فالميكانيكا الكمية هي نظرية أعمق من ذلك بكثير، حيث قامت بتزويدنا بنظرة مختلفة كثيرا عن الذرة. وطبقا للميكانيكا الكمية، فإنّ الإلكترونات لا توجد في أفلاك دائرية معرفة بإتقان كما في نظرية بور. وبدلًا من ذلك، فإنّ الإلكترون (بسبب طبيعته الموجية) يمكن تصوره على أنه منتشرٌ في الفضاء مثل "السّحابة". ويمكن حساب حجم السحابة الإلكترونية وشكلها لحالة معينة في ذرة ما. وللحالة الأرضية في ذرة الهيدروجين، فإنّ هذه السحابة الإلكترونية متماثلة كرويّا، كما هو مبين في (الشكل 28 – 6). وتوحي السحابة الإلكترونية بصورة غير دقيقة "بحجم" الذرة، ولكن كالسحابة التي قد لا تملك حدودا واضحة، فإنّ الذرات لا تملك حدودًا دقيقة أو حجما معرفا بدقة. وأنّ هذه السحابات الإلكترونية لا تمتلك جميعها حجما كرويّا، كما سنرى لاحقا في هذا الفصل.

يمكن أن تفسر السحابة الإلكترونية من وجهة نظر جسيمية أو موجية. وتذكر أنّ ما نعنيه بالجسم شيئا مثبتا في الفضاء؛ أي أنّ له موضعا محدّدًا عند لحظة معينة. وعلى النقيض من ذلك، فإنّ الموجة منتشرة في الفضاء. إنّ السحابة الإلكترونية المنتشرة في الفضاء كما في (الشكل 28 – 6)، ناجمة من الطبيعة الموجية للإلكترونات. ويمكن أن تفسّر السحابات الإلكترونية أيضا **كتوزيعات احتمالية** للجسم. وإذا كان عليك قياس موضع إلكترون في ذرة هيدروجين 500 مرة مختلفة، فإنّ غالبية النتائج ستظهر الإلكترون في نقاط حيث الاحتمالية عالية (المنطقة المظلمة في الشكل 28 – 6). وأحيانا فقط يمكن إيجاد الإلكترون حيث الاحتمالية منخفضة.



الشكل 28 – 6 سحابة إلكترونية أو "توزيع احتمالي" للحالة الأرضية لذرة الهيدروجين. تمثل الدائرة المتقطعة نصف قطر بور. (هذه شريحة ثنائية الأبعاد خلال الذرة وتحتوي على النواة).

توزيعات احتمالية

6-28 الميكانيكا الكمية لذرة الهيدروجين، الأعداد الكمية

سننظر الآن بإمعان أكثر إلى ما تخبرنا به الميكانيكا الكمية حول ذرة الهيدروجين. وكثيرًا مّا نقوله هنا ينطبق أيضا على الذرات الأكثر تعقيدا التي نوقشت في البند التالي.

تعدّ الميكانيكا الكمية نظرية أكثر تعقيدًا ونجاحًا بكثير من نظرية بور. ومع هذا، فالنظريتان تتوافقان في بعض التفاصيل. تتنبأ الميكانيكا الكمية بمستويات الطاقة الأساسية نفسها (الشكل 27 – 27) لذرة الهيدروجين تماما مثل نظرية بور. أي أنّ

$$E_n = -\frac{13.6\ \text{eV}}{n^2}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

ويمثل n عددًا صحيحًا. وفي نظرية بور البسيطة، كان هناك عدد كميّ واحد فقط، n. أمّا في الميكانيكا الكمّيّة، فقد ظهر أنه لابد من وجود أربعة أعداد كمّيّة مختلفة لتحديد كلّ حالة في الذرة.

العدد الكمّيّ الرّئيس، n

(1) وُجدَ *العدد الكمّيّ*، n، من نظرية بور أيضا في الميكانيكا الكمّيّة، ويُدعى **العدد الكمّيّ الرئيسي**.ويمكن أن تكون قيمته أيّ عددٍ صحيح من 1 إلى ∞. وتعتمد الطاقة الكلية لحالة ما في ذرة الهيدروجين على n، كما رأينا سابقا.

العدد الذّري الفلكي، l
$0 \le l \le n-1$

(2) **العدد الكمي الفلكي**، l، ويرتبط بقيمة الزخم الزاوي للإلكترون. l يمكن أن يأخذ قيما صحيحة من 0 إلى $(n-1)$. وللحالة الأرضية $n = 1$، يمكن لـ l أن يكون صفرا فقط.* وعندما $n = 3$ يمكن لـl أن يكون 0 ,1 أو 2.

* ميزها عن نظرية بور، حيث $l = 1$ بالنسبة للحالة الأرضية. (المعادلة 27 - 11).

القيمة الفعلية للزخم الزاوي L ترتبط بالعدد الكمي l بواسطة.

$$L = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar \qquad \textbf{(3-28)}$$

(وهنا أيضا $\hbar = h/2\pi$). وعلى نحو تقريبي، لايوجد لقيمة l تأثير في الطاقة الكلية في ذرة الهيدروجين، وإنما تؤثر فيها قيمة n إلى حد ملموس فقط (ولكن انظر إلى التركيب الدقيق بالأسفل). وفي الذرات ذات الإلكترونين أو أكثر، فإنّ الطاقة تعتمد فعليًّا على l إضافة إلى n، كما سنرى.

(3) يرتبط **العدد الكمّي المغناطيسي**، m_l، باتجاه زخم الإلكترون الزاوي: ويمكن أن يأخذ قيم أرقام صحيحة تمتد من $-l$ إلى $+l$. وعلى سبيل المثال، إذا كانت $l = 2$، يمكن أن تكون قيم m_l -2,-1,0,+1,+2. وبما أنّ الزخم الزاوي متجه، فليس من المستغرب أن يكون كلًّا من قيمته واتجاهه مكمّمًا. ولـ $l = 2$، الاتجاهات الخمسة المسموحة يمكن تمثيلها بمخطط كما في (الشكل $28-7$). وهذا التحديد على اتجاه $\mathbf{L}$ يُدعى عادة **تكمية الفضاء**. وفي الميكانيكا الكمية، يحدد اتجاه الزخم الزاوي عادة بإعطاء مركبته على امتداد محور L_z (هذا الخيار عشوائيّ). وعندها تكون L_z مرتبطة بـ m_l بواسطة المعادلة

$$L_z = m_l \hbar$$

إلاّ أنّ قيم L_x و L_y غير محددة. إنّ الاسم m_l غير مشتق من النظرية (والتي تربطه بـ L_z) ولكنّه مشتقّ من التجربة. ولقد وُجدَ أنه عند وضع أنبوب تفريغ غازي في مجالٍ مغناطيسي، فإنّ الأطياف الخطية تنشطر إلى خطوط عديدة قريبة جدًّا من بعضها. وهذا الانشطار، المعروف **بتأثير زيمان**، يوحي بأنّ مستويات الطاقة يجب أن تكون منشطرة (الشكل $28-8$). ولذلك، فإنّ طاقة المستوى لن تعتمد على n فقط، ولكنها ستعتمد أيضا على m_l عند تطبيق مجال مغناطيسي؛ وعليه، يدعى " العدد الكمي المغناطيسي".

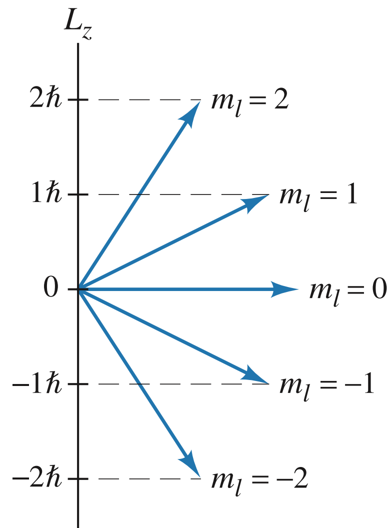
(4) وأخيرًا، هناك **العدد الكميّ المغزليّ**، m_s، ويمكن لأيّ إلكترون يغزل أن يأخذ قيمتين فقط، هما : $m_s = -\frac{1}{2}$ و $m_s = +\frac{1}{2}$. ووجود العدد الكمي هذا لم يأتِ من معادلة شرودينجر الأصلية، مثل كلّ من $n, l,$ و m_l. وبدلا من ذلك، فسّر ديراك ($1902 - 1984$) وجوده كتأثير نسبويّ في تعديل لاحق. وأوّل تلميح على ضرورة وجود m_s ـــ بالرغم من ذلك ـــ جاء من التجربة . لقد أظهرت الدراسة المتأنية لأطياف الهيدروجين الخطية أنّ كلا منها يتكون فعليًّا من خطين (أو أكثر) قريبين جدًّا من بعضهما بعضًا، حتى عند غياب المجال المغناطيسي الخارجي. وتمّ الافتراض في البداية أنّ هذا الانشطار في مستويات الطاقة -ـــ المُسمّى **التركيب الدقيق**-ـــ ناتج من الزخم الزاويّ المرتبط بغزل الإلكترون. أي، يمكن للإلكترون أن يغزل (يبرم) حول محوره إضافة لدورانه حول النواة، تماما مثلما تبرم الأرض حول محورها وهي تدور حول الشمس . ويمكن للتيار الضئيل للإلكترون الغزول (البرّام) لاحقا أن يتفاعل مع المجال المغناطيسي الناتج من الشحنة الدوارة مسببًا **التركيب الدقيق** الملاحظ في مستويات الطاقة. (وعندئذٍ ستعتمد الطاقة قليلا على m_l و m_s).وحاليا، لا تعدّ هذه الصورة من غزل الإلكترون مسموحة. ولا نستطيع حتى تخيّل الإلكترون كجسم مركزيّ، ولا لدرجة أقلّ كجسم غزول (برّام). والشّيء المهم هو أنّ الإلكترون يمكن أن يمتلك حالتين مختلفتين نتيجة بعض الخصائص الضمنية التي تتصرف كالزخم الزاويّ، ولا زلنا ندعو هذه الصفة "غزلا". والقيمتان المكنتنان لـ m_s ($-\frac{1}{2}$ و $+\frac{1}{2}$) عادة تدعيان "غزلا علويّا" و "غزلا سفليّا". نسبة إلى الاتجاهين المكنين للغزل الكميّ الزاويّ.

القيم المكنة للأعداد الكمية الأربعة للإلكترون في ذرة الهيدروجين ملخصة في (الجدول $28-1$).

الجدول $28-1$ الأعداد الكمية لإلكترون

الاســــم	الرمـــز	القيم الممكنة
رئيسي	n	$1, 2, 3, \cdots, \infty$
فلكيّ (مداري)	l	لأجل n معطاة: يمكن أن تكون l: $0, 1, 2, \cdots, n-1$
مغناطيسيّ	m_l	لأجل n و l معطاتان: يمكن m_l أن يكون: $l, l-1, \cdots, 0, \cdots, -l$
غزليّ	m_s	لكلّ مجموعة من n و l و m_l : m_s يمكن أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$

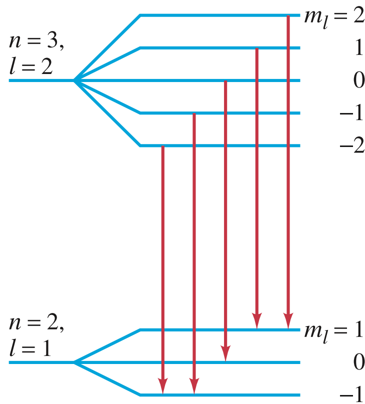
العدد الكمّي المغناطيسيّ m_l
$-l \le m_l < l$



الشكل 28 – 7 تكمية اتجاه الزخم الزاويّ لـ l=2.

العدد الكمّي المغزليّ، m_s
$m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$

الشكل 28 – 8 عند تطبيق مجال مغناطيسي، ينشطر مستوى طاقة $n = 3$ و $l = 2$ إلى خمسة مستويات ترتبط بخمس قيم لـ m_l $(2, 1, 0, -1, -2)$. وينشطر المستوى $n = 2,\ l = 1$ إلى ثلاث مستويات $(m_l = 1, 0, -1)$. وتحدث الانتقالات بين مستويات (ليست جميعها معروضة)، مع انبعاث فوتونات بترددات عديدة مختلفة قليلاً (تأثير زيمان).



المثال المفاهيمي 3-28 الحالات المحتملة لـ $n = 3$

كم عدد الحالات المختلفة الممكنة لإلكترون عدده الكمّي الأساس $n = 3$؟

الإجابة عندما $n = 3$، تستطيع l أن تأخذ القيم $l = 2, \ 1, 0$. وعندما $l = 2$، تستطيع m_l أن تكون $2, 1, 0, -1, -2,$ وهي خمسة احتمالات مختلفة. ولكلّ منها، تستطيع m_s أن تكون إلى الأعلى أو إلى الأسفل ($+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$). ولذلك، عندما $l = 2$، هناك $2 \times 5 = 10$ حالات. وعند $l = 1$، تستطيع m_l أن تكون $1, 0, -1$، وبما أنّ m_s يمكن أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$ لكلّ منها، فإنّ هناك 6 حالات ممكنة أخرى. وأخيرا، عندما $l = 0$ فإنّ m_l تستطيع أن تكون 0 فقط، وهناك فقط مستويان يعودان إلى $m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$. والعدد الكليّ للحالات يساوي $18 = 2 + 6 + 10$، كما هو مبيّن في الجدول التالي:

n	l	m_l	m_s	n	l	m_l	m_s
3	2	2	$\frac{1}{2}$	3	1	1	$\frac{1}{2}$
3	2	2	$-\frac{1}{2}$	3	1	1	$-\frac{1}{2}$
3	2	1	$\frac{1}{2}$	3	1	0	$\frac{1}{2}$
3	2	1	$-\frac{1}{2}$	3	1	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	$\frac{1}{2}$	3	1	-1	$\frac{1}{2}$
3	2	0	$-\frac{1}{2}$	3	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	2	-1	$\frac{1}{2}$	3	0	0	$\frac{1}{2}$
3	2	-1	$-\frac{1}{2}$	3	0	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	-2	$\frac{1}{2}$				
3	2	-2	$-\frac{1}{2}$				

التمرين ب: إلكترون له القيم $n = 4, \ l = 2$. أيّ من قيم m_l التالية ممكنة: $4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4$؟

المثال 4-28 E و L عند $n = 3$

حدّد كلا من: (أ) الطاقة. (ب) الزخم الزاوي الفلكي لإلكترون في كلّ من أفلاك ذرة الهيدروجين في (المثال 28 – 3).

النّهج: (أ) تعتمد طاقة الحالة على n فقط، باستثناء ما للتعديل البسيط المذكور في الأعلى، والذي سنهمله. وتحسب الطاقة كما في نظرية بور، $E_n = -13.6 \, \text{eV}/n^2$. ونستخدم للزخم الزاوي (المعادلة 28 – 3).

الحلّ: بما أنّ $n = 3$ لهذه الحالات جميعها، فهي جميعها تمتلك الطاقة ذاتها:

$$E_3 = -\frac{13.6 \, \text{eV}}{(3)^2} = -1.51 \, \text{eV}$$

(ب) عند $l = 0$ ، تعطي (المعادلة 28 – 3)

$$L = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar = 0$$

وعند $l = 1$ ،

$$L = \sqrt{1(1+1)}\,\hbar = \sqrt{2}\,\hbar = 1.49 \times 10^{-34} \, \text{J} \cdot \text{s}$$

وعند $l=2$،

$$L = \sqrt{2(2+1)}\,\hbar = \sqrt{6}\,\hbar$$

ملحوظة: الزخم الزاوي الذري يعطى بشكل عام كمضاعفات $\hbar$ (في هذه الحالة $\sqrt{6}\,\hbar$ أو $\sqrt{2}\,\hbar$) بدلًا منه بوحدات SI.

التمرين جـ : ما الطاقة والزخم الزاوي للإلكترون في ذرة هيدروجين ذات $n = 6, \ l = 4$ ؟

وعلى الرغم من أنّ l و m_l لا يؤثران بشكل كبير في مستويات الطاقة في الهيدروجين، إلاّ أنّهما يؤثران في التوزيع الاحتمالي للإلكترون في الفضاء. وعندما $n = 1$، يستطيع كلّ من l و m_l فقط أن يكون صفرًا، والتوزيع الإلكتروني كما هو مبين في (الشكل 28 – 6).

وعندما $n = 2$، تستطيع l أن تكون 0 أو 1. ويبدو التوزيع لـ $n = 2$، و $l = 0$ كما هو مبيّن في (الشكل 28 – 9 أ) مختلفا عن توزيع الحالة الأرضية (الشكل 28- 6)، بالرغم من أنه لا يزال كرويّا منتظمًا. وعندما $n = 2$، و $l = 1$، فإنّ التوزيعات ليست كروية متماثلة كما هو مبين في الشكلين (28 – 9 ب) $(m_l = 0)$ و(28 – 9 جـ) ($m_l = +1$ أو -1).

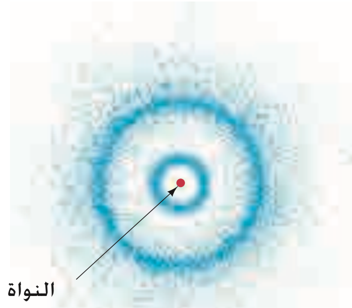
وبالرغم من أنّ التوزيعات الفضائية للإلكترون يمكن حسابها لمختلف الحالات، إلاّ أنّه من الصعب قياسها عمليًا. ومعظم المعلومات العملية حول الذرة أتت من فحصٍ متأنٍّ لأطياف الانبعاث تحت الظروف المختلفة.

*قواعد الانتقاء : الانتقالات المسموحة والممنوعة

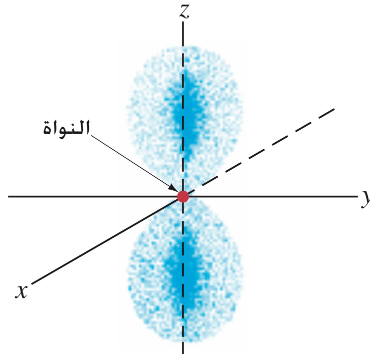
هناك تنبؤ آخرٌ للميكانيكا الكمية هو أنه عند انبعاث ضوء (فوتون) أو امتصاصه، فإنّ الانتقالات يمكن أن تحدث فقط بين حالات تختلف قيم l بينها بمقدار وحدة واحدة تمامًا :

$$\Delta l = \pm 1$$

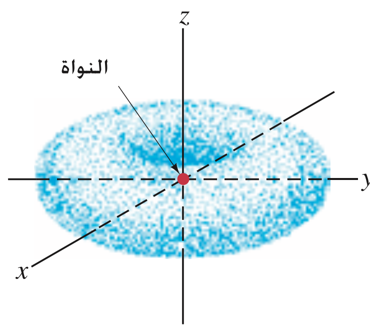
وطبقًا لقاعدة الانتقاء هذه، فإنّ إلكترونا في حالة $l = 2$ يستطيع القفز فقط إلى حالة أخرى ذات $l = 1$ أو $l = 3$. ولا يستطيع القفز إلى حالة ذات $l = 2$ أو $l = 0$. ويُدعى القفز من $l = 2$ إلى $l = 0$ **انتقالًا ممنوعا**. وفي الحقيقة، فإنّ انتقالًا من هذا النوع غير ممنوع تمامًا، بل يمكن حدوثه، ولكن احتمال ذلك صغيرٌ جدّا مقارنة مع **الانتقالات المسموحة**؛ تلك التي تحقق قاعدة الانتقاء $\Delta l = \pm 1$ وبما أنّ الزخم الزاويّ الفلكيّ (المداري) لذرة H يجب أن يتغير بوحدة واحدة عندما ينبعث منها فوتون، فإنّ حفظ الزخم يفيد بأنّ الفوتون يجب أن يحمل زخما زاويّا. وبالفعل، هناك أنواعٌ كثيرةٌ من الأدلة العملية تظهر إمكانية إعطاء الفوتون زخمًا زاويًّا مغزليًّا مقداره $1\hbar$.



(أ) $n = 2, l = 0, m_l = 0$



(ب) $n = 2, l = 1, m_l = 0$



(جـ) $n = 2, l = 1, m_l = \pm 1$

الشكل 28 – 9 سحابة إلكترونية، أو توزيع احتمالي، للحالات $n = 2$ في الهيدروجين.

7-28 ذرات غير بسيطة؛ مبدأ الاستبعاد

لقد ناقشنا ذرة الهيدروجين بالتفصيل لأنّها أبسط ما يمكن التعامل معه. وسنناقش الآن باختصار الذرات الأكثر تعقيدًا، أي الذرات التي تحتوي على أكثر من إلكترون، والتي يمكن تحديد مستويات طاقتها عمليًّا من تحليل أطياف الانبعاث. إنّ مستويات الطاقة ليست مشابهة لتلك التي في ذرة H؛ لأنّ الإلكترونات تتفاعل مع بعضها بعضا بالإضافة إلى تفاعلها مع النواة. ولا يزال كلّ إلكترون في الذرة المعقدة يشغل مستوى خاصّا متميزًا بأعداده الكمية الأربعة n, l, m_l و m_s. وتعتمد مستويات الطاقة في الذرات التي تمتلك أكثر من إلكترون على كلّ من n و l.

إنّ عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة يسمى **العدد الذري** Z. وهو يُمثِّلُ أيضا عدد الشحنات الموجبة (البروتونات) في النواة، كما يحدّدُ نوع الذرة. أي أنّ Z يحدد معظم الخصائص التي تفرق بين ذرة وأخرى.

أثبتت الميكانيكا الكمية في سنوات ما بعد 1925 نجاحها أيضًا في التعامل مع الذرات المعقدة . وأصبحت الرياضيات صعبة جدّا رغم ذلك، بسبب عدم انجذاب كلّ إلكترون على حدة إلى النواة فقط في الذرات المحتوية على إلكترونات عديدة، بل أيضا طرده بواسطة الإلكترونات الأخرى.

ولفهم ترتيبات الإلكترونات المحتملة في الذرة؛ كانت هناك حاجة لمبدأ جديد، تم تقديمه من قِبَل وولفجانج باولي (1900 – 1958، الشكل 28 – 2) حيث دُعِي **مبدأ باولي للاستبعاد**. وينصّ هذا المبدأ على مايلي:

لا يستطيع إلكترونان في أيّ ذرة أن يحتلّا الحالة والكمّيّة ذاتيهما.

وبذلك، فلا يستطيع أيّ إلكترونين في أيّ ذرة أن يمتلكا مجموعة الأعداد الكمية نفسها n, l, m_l و m_s . ويشكّل مبدأ الاستبعاد لباولي* القاعدة لفهم الجزيئات والروابط، والظواهر الأخرى، وليس لفهم الذرات المعقدة فقط.

مبدأ باولي للاستبعاد

* يطبق مبدأ الاستبعاد على الأجسام المتشابهة بما فيها الإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات ذات العدد الكميّ المغزلي المساوي لنصف عدد صحيح ($\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$، وهكذا دواليك). وتدعى هذه الأجسام فيرميونات (نسبة لأنريكو فيرمي الذي اشتق نظرية إحصائية لوصفها). ولا ينطبق مبدأ الاستبعاد على الأجسام ذات الغزل المساوي لعدد صحيح (0, 1, 2 وهكذا دواليك)، مثل الفوتون وπ ميزون، والتي يشار إليها جميعا على أنها **بوزونات** (نسبة لساتيندرانات بوز الذي اشتق لها نظرية إحصائية خاصة بها).

والآن، لننظر إلى تركيب بعض الذرّات البسيطة عندما تكون في الحالة الأرضيّة. وبعد الهيدروجين، فإنّ ثاني أبسط ذرة هي الهيليوم ذات الإلكترونين. ويمكن لكلا الإلكترونين أن يمتلكا $n = 1$؛ لأنّ غزل أحدهما يمكن أن يكون إلى الأعلى ($m_s = +\frac{1}{2}$)، في حين يكون غزل الآخر إلى الأسفل ($m_s = -\frac{1}{2}$). وبذلك يحققان مبدأ الاستبعاد. وبما أنّ $n = 1$، فإنّ l و m_l يجب أن يكونا صفرًا (الجدول $28 - 1$). وعليه، فإنّ الإلكترونين سيمتلكان الأعداد الكمية المبينة في الجدول الذي في الهامش.

أمّا الليثيوم، فيمتلك ثلاثة إلكترونات. ويمكن لإلكترونين منها أن يمتلكا $n = 1$. ولكن الإلكترون الثالث لا يمكنه ذلك دون أن يخالف مبدأ الاستبعاد. لذا، فإنّ هذا الإلكترون يجب أن يمتلك $n = 2$. ومن المصادف أنّ المستوى $n = 2$ و $l = 0$ له طاقة أقلّ من $n = 2$ و $l = 1$. ولهذا، فإنّ الإلكترونات في الحالة الأرضية لها الأعداد الكمية المعروضة في الجدول الذي في الهامش. الأعداد الكمية للإلكترون الثالث يمكن أن تكون $(n, l, m_l, m_s) = (3, 1, -1, \frac{1}{2})$. ولكن الذرة في هذه الحالة ستكون في حالة مهيجة لأنها ستمتلك طاقة أكبر. ولن يمرّ وقت طويل قبل أنّ تقفز إلى الحالة الأرضية مصحوبة بانبعاث فوتوني. وعند درجة حرارة الغرفة، فإنّ الأغلبية العظمى للذرات ستكون في هذه الحالة الأرضية، إلاّ إذا زوّدت بطاقة إضافية (كما في أنبوب التفريغ). ونستطيع أن نستمر في هذه الطريقة لوصف الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية للذرات الأكبر والأكبر. والأعداد الكمية للصوديوم، مع إلكتروناته الأحد عشر، مبينة في الجدول الذي في الهامش.

يظهر (الشكل $28 - 10$) مخطّط مستوى طاقة بسيط حيث الحالات المأهولة مبينة به كأسهم، مشيرة إلى الأعلى أو إلى الأسفل ($m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$) أمّا الحالات الممكنة الفارغة، فمبينة كدائرة صغيرة.

هيليوم $Z = 2$

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$

ليثيوم $Z = 3$

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$

صوديوم $Z = 11$

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$\frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$\frac{1}{2}$
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	0	0	$\frac{1}{2}$

الشكل $28 - 10$ مخطط مستوى طاقة يظهر الحالات المأهولة (أسهم) والحالات غير المأهولة (°) لكلّ من He, Li و Na. لاحظ أننا بيّنا مستوى $n = 2,\ l = 1$ لعنصر الليثيوم على الرغم من أنه فارغ.

8-28 الجدول الدوري للعناصر

قبل أكثر من قرن، رتب دميتري مندليف (1834 – 1907) العناصر المعروفة (في حينه) في ما نطلق عليه حاليًا **الجدول الدوري** للعناصر. ورُتبت الذرات حسب تزايد الكتلة، مع مراعاة أن تقع العناصر ذات الخصائص الكيميائية المتشابهة في العمود نفسه. والنسخة الحالية مبيّنة داخل الغلاف الخلفي لهذا الكتاب. يحتوي كلّ مربع على العدد الذري Z ، ورمز العنصر، والكتلة الذرية (بدلالة وحدات الكتل الذرية). وفي النهاية، تظهر الزاوية السفلية اليسرى ترتيب الحالة الأرضية للذرة. وهذا يتطلب بعض التفسير. يشار إلى الإلكترونات التي لها قيمة n نفسها على أنها موجودة في **القشرة** نفسها؛ فالإلكترونات ذات $n = 1$ تكون في القشرة نفسها ***(القشرة K)***. أما الإلكترونات ذات $n = 2$ فتكون في **القشرة الثانية** (القشرة L)، في حين تكون الإلكترونات ذات $n = 3$ في القشرة (M) الثالثة، وهكذا دواليك. والإلكترونات التي لها قيم n و l نفسها يُشار إلى أنّها موجودة في **القشرة الفرعية** نفسها. وتستخدم الحروف عادة لتحديد قيمة l كما هو مبين في (الجدول $28 - 2$). أي أنّ $l = 0$ هي القشرة الفرعية s، و $l = 1$ هي القشرة الفرعية p، و $l = 2$ هي القشرة الفرعية d. وابتداءً من $l = 3$، فإنّ الأحرف تتبع f, g, h, i وهكذا دواليك. (في البداية، كانت الأحرف الأولى: s, p, d و f اختصارات لحدود تجريبية تشير إلى الأطياف الآتية: "حادة"، و "رئيسي"، و "منتشر"، و أساسي").

الجدول 28 – 2 قيمة l

قيمة l	الرمز الحرفي	أكبر عدد للإلكترونات في القشرة الفرعية
0	s	2
1	p	6
2	d	10
3	f	14
4	g	18
5	h	22
⋮	⋮	⋮

يُحدِّدُ مبدأ باولي للاستبعاد عدد الإلكترونات الممكنة في كلّ قشرة وقشرة فرعية. ولأيّ قيمة لـ l هناك $2l + 1$ قيم ممكنة لـ m_l (يمكن لـ m_l أن تأخذ أيّ عدد صحيح من 1 إلى l . ومن -1 إلى $-l$ أو صفر)، إضافة إلى القيمتين الممكنتين لـ m_s. ولذلك، يمكن أن يتوافر $2(2l + 1)$ إلكترونًا على الأكثر في أيّ قشرة فرعية 1 . وعلى سبيل المثال، عندما $l = 2$، هناك خمس قيم لـ m_l ممكنة $(2, 1, 0, -1, -2)$، ولكلّ من هذه، يمكن لـ m_s أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$ ليكون المجموع $2(5) = 10$ حالات .
ويبين (الجدول $28 - 2$) أكبر عدد من الإلكترونات التي يمكن أن تملأ كلّ قشرة فرعية.

وبما أنّ مستويات الطاقة تعتمد بشكل كلّيّ على القيمتين n و l تقريبا، فقد جرت العادة أن يُحدّد التركيب (الترتيب) الإلكتروني ببساطة بإعطاء قيمة n والحرف المناسب لـ l، مع إعطاء عدد الإلكترونات في كلّ قشرة فرعية كرمز علويّ. يكتب تركيب الحالة الأرضية للصوديوم، على سبيل المثال، كالتالي: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. وتمّ تبسيط هذا في الجدول الدوري بتحديد ترتيب الإلكترونات الخارجية الأبعد فقط وأيّ قشرة فرعية أخرى غير مملوءة (انظر الجدول $28 - 3$ هنا، والجدول الدّوريّ داخل الغلاف الخلفي).

المثال المفاهيمي 5-28 **تركيبات إلكترونية**

أيّ من التركيبات التالية ممكن، وأيّ منها غير ممكن:
(أ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^3$. (ب) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5 4s^2$. (جـ) $1s^2 2s^2 2p^6 2d^1$؟

الإجابة: (أ) هذا التركيب غير ممكن؛ بسبب عدد الإلكترونات الكبير(3) المبين في القشرة الفرعية s من القشرة $(n = 3)$ M للقشرة الفرعية s المحتوية على خانتين فقط، لإلكترونات " الغزل العلوي" "والغزل السفلي".
(ب) هذا التركيب ممكن، ولكنه حالة مهيجة. قفز أحد الإلكترونات من القشرة الفرعية $3p$ إلى الأعلى إلى القشرة الفرعية $4s$. وبما أنّ هناك 19 إلكترونًا، فإنّ العنصر هو البوتاسيوم.
(جـ) هذا التركيب غير ممكن؛ لعدم وجود قشرة فرعية d $(l = 2)$ داخل القشرة $n = 2$ (الجدول $28 - 1$) . يجب أن يكون الإلكترون الخارجي الأبعد (على الأقل) داخل القشرة $n = 3$.

التمرين د: اكتب تركيب الحالة الأرضية كاملا للجاليوم بإلكتروناته الواحد والثلاثين.

الجدول 28 - 3
التركيب الإلكتروني لبعض العناصر

(عدد الإلكترونات Z)	العنصر *	توزيع الحالة الأرضية (الإلكترونات الخارجية)
1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$2s^1$
4	Be	$2s^2$
5	B	$2s^2 2p^1$
6	C	$2s^2 2p^2$
7	N	$2s^2 2p^3$
8	O	$2s^2 2p^4$
9	F	$2s^2 2p^5$
10	Ne	$2s^2 2p^6$
11	Na	$3s^1$
12	Mg	$3s^2$
13	Al	$3s^2 3p^1$
14	Si	$3s^2 3p^2$
15	P	$3s^2 3p^3$
16	S	$3s^2 3p^4$
17	Cl	$3s^2 3p^5$
18	Ar	$3s^2 3p^6$
19	K	$4s^1$
20	Ca	$4s^2$
21	Sc	$3d^1 4s^2$
22	Ti	$3d^2 4s^2$
23	V	$3d^3 4s^2$
24	Cr	$3d^5 4s^1$
25	Mn	$3d^5 4s^2$
26	Fe	$3d^6 4s^2$

* يمكن أن تجد أسماء العناصر في الفهرس ب.

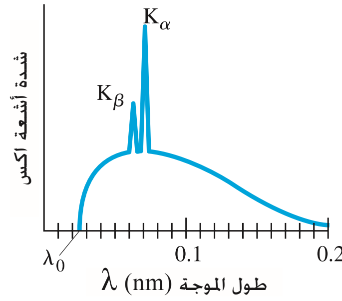
إنّ وضع الذرات في مجموعات الجدول الدوري يتمّ حسب ازدياد العدد الذري، Z. وهناك أيضًا تنظيم قويّ حسب الخصائص الكيميائية. وبالرغم من معالجة هذا في كتب الكيمياء، إلا أننا نناقشه هنا بشكل سريع لأنّه أحد نتائج الميكانيكا الكمية. انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي.
تمتلك الغازات النبيلة، (في العمود VIII من الجدول الدوري) جميعها قشورا أو قشورًا فرعيّةً مملوءةً. أي أنّ قشرتها الخارجية الأبعد مملوءة تمامًا، والتوزيع الإلكتروني دائري متماثل. ومع هذا التماثل الكروي التام، فإنّ الإلكترونات الأخرى لن تنجذب، ولن تفقد الإلكترونات من تلقاء أنفسها (طاقة التأين مرتفعة). ويعدّ هذا السبب الرئيس وراء كون الغازات النبيلة غير نشطة (سنتناول المزيد عند مناقشة الجزيئات والروابط في الفصل 29). يحتوي العمود VII على **الهالوجينات**، وهي تقلّ بمقدار إلكترونٍ واحدٍ عما تحتويه القشرة المملوءة. وبسبب أشكال المدارات (انظر البند $29 - 1$)، يمكن قبول إلكترون إضافي من ذرة أخرى. لذا، تعد هذه العناصر نشطة تماما. وتكافؤها -1، وهذا يعني أنه عند اكتساب إلكترونٍ إضافيّ، فإنّ الأيون الناتج سيمتلك شحنة صافية مقدارها $-1e$. يحتوي العمود I من الجدول الدوري على **الفلزات القلوية**، وكلّ منها يمتلك إلكترون s وحيدا خارجيا. ويمضي هذا الإلكترون معظم وقته خارج القشور والقشور الفرعية المغلقة الداخلية التي تمنع عنه تأثير معظم الشحنة النووية. وبالفعل، فإنّه بعيدٌ نسبيًّا عن النواة، وينجذب إليها بواسطة شحنة صافية مقدارها $+1e$ تقريبا، بسبب أثر الحجب من الإلكترونات الأخرى. لذا، فإنّ من السهل إبعاد إلكترون الفلك الخارجي هذا، والذي يستطيع أن يقضي معظم وقته حول ذرة أخرى، مكوّنًا جزيئًا . وهذا هو السبب في أنّ الفلزات القلوية نشطة جدّا ولها تكافؤ $+1$. ويمكن أن تعامل الأعمدة الأخرى في الجدول الدوري بالمثل.

إنّ وجود **العناصر الانتقالية** في مركز الجدول، إضافةً إلى اللانثنات (عناصر الأرض النادرة) والأكتينات بالأسفل ناتج من القشور الداخلية غير المكتملة. وللعناصر ذات أخفض Z، فإنّ القشور الفرعية تملأ بتتابع بسيط كالآتي: أولا $1s$، ثم $2s$، ثمّ $2p$، ثمّ $3s$، ثمّ $3p$. ويمكن أن تتوقع أن يملأ بعد ذلك $3d$ $(n = 3,\ l = 2)$. ولكن ليس هذا ما يحدث. وبدلًا من ذلك، فإنّ المستوى $4s$ يمتلك فعليًّا طاقة أقلّ بقليل من $3d$ (نتيجة تفاعل الإلكترونات مع بعضها بعضًا). فتمتلئ أولا (K و Ca). وعند ذلك فقط، تبدأ القشرة $3d$ بالامتلاء، بداية مع Sc، كما في (الجدول 28 – 3). (ولأنّ المستويين 4s و 3d قريبان من بعضهما، فإنّ بعض العناصر تمتلك إلكترون $4s$ واحدًا فقط، مثل Cr). ومعظم الخصائص الكيميائية لهذه العناصر الانتقالية محكومة بإلكترونات $4s$ ضعيفة التقييد نسبيّا. لذا، فهي تمتلك عادة تكافؤ $+1$ أو $+2$. وهناك أثر مماثل مسؤول عن اللانثنات والأكتينات، المبينة أسفل الجدول الدوري للسهولة. وجميعها ذات خصائص كيميائية متشابهة، حُدّدت بواسطة إلكترونيها الخارجيين $6s$ أو $7s$، في حين يبقى أثر أعداد الإلكترونات في القشور الداخلية غير المملوءة ضئيلًا.

تنويه: القشور الفرعية لا تملأ دائما "بالترتيب".

* 9-28 أطياف أشعّة إكس والعدد الذّرّيّ

إنّ الأطياف الخطيّة للذرّات في مناطق الضوء المرئي، وفوق البنفسجية (UV)، وتحت الحمراء (IR) من الطيف الكهرومغناطيسي EM ناجمة بشكل رئيس عن انتقال بين الحالات للألكترونات المدارات الخارجية . وقد تمّ تحصين غالبية شحنة النواة من هذه الإلكترونات بواسطة الشحنة السالبة على الإلكترونات الداخلية. ولكن الإلكترونات الداخلية العميقة في القشرة $n = 1$ "ترى" الشحنة الكلية للنواة . وبما أنّ طاقة أيّ مستوى تتناسب مع Z^2 (انظر المعادلة 27 – 15)، فإنّنا نتوقع لذرة ذات $Z = 50$. أطوال أمواج تقارب $50^2 = 2500$ ضعفًا أقصر من تلك التي وجدت في سلسلة لايمان للهيدروجين (حول 100 nm)، أو 10^{-2} إلى 10^{-1} nm. وأطوال مَوْجيّة قصيرة كهذه تقع في منطقة أشعة إكس من الطيف.

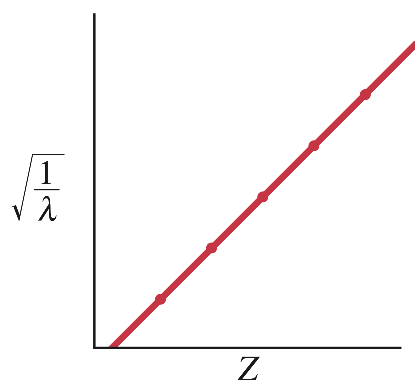


الشكل 28 – 11 طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف الموليبدينيوم في أنبوب أشعة إكس المُفعّل عند 50 kV

تُنْتَجُ أشعة إكس عند اصطدام الإلكترونات المُسرّعة بواسطة جهدٍ عالٍ بهدفٍ فلزّي داخل أنبوب أشعة إكس (البند 25 – 11). وعندما ننظر إلى طيف أطوال الأمواج المنبعثة من أنبوب أشعة إكس، نرى أنّ الطيف يتكوّن من جزأين؛ طيف مستمر ذي قطع عند λ_0 ما والتي تعتمد فقط على الفولتية خلال الأنبوب، وسلسلة من القمم المركبة عليه. وهناك مثالٌ عاديّ مبَيّنٌ في (الشكل 28 – 11). المنحنى الأملس وطول موجة القطع λ_0 يتحركان نحو اليسار كلّما ازدادت الفولتية خلال الأنبوب. وعلى الرغم من ذلك، تبقى الخطوط أو القمم الدقيقة (الموسومة K_α و K_β في الشكل 28 – 11)، عند الطول الموجي نفسه عند تغير الفولتية، رغم أنّه سيتمّ إيجادها عند أطوال أمواج مختلفة إذا ما استخدمت أهداف مادية مختلفة. وتقترح هذه الملاحظة التميز في قمم المواد المستخدمة. وبالفعل، نستطيع تفسير ذلك عن طريق التّخيّل بأنّ الإلكترونات المُسرّعة بواسطة الجهد العالي للأنبوب تستطيع أن تصل إلى طاقات كافية تجعلها قادرة في حالة تصادمها مع ذرات الهدف على طرد أحد الإلكترونات الداخلية المقيدة بإحكام نحو الخارج. وعندئذٍ نفسّرُ **أشعة إكس المميزة** هذه (القمم في الشكل 28 – 11) كفوتونات منبعثة عندما يسقط إلكترون إلى الأسفل من حالة علوية ليملأ حالة سفلية خاوية. تنتج خطوط K من انتقالات إلى القشرة $K(n = 1)$. ويتكون خطّ K_α من فوتونات منبعثة نتيجة انتقال ينشأ من القشرة (L) $n = 2$ لتسقط إلى القشرة n=1**(K)**، أمّا خطّ K_β فيعكس انتقالًا من القشرة (M) $n = 3$ سقوطًا إلى القشرة K. في حين ينتج خط L من انتقال إلى القشرة L، وهكذا دواليك.

أشعة إكس المميزة.

لقد سمح قياس أطياف أشعة إكس المميزة بتحديد مستويات الطاقة الداخلية للذرات. كما سمح أيضًا بتحديد قيم Z لذرات عديدة؛ لأنّ الطول الموجي (كما رأينا) لأقصر أشعة إكس منبعثة سيتناسب عكسيًّا مع Z^2. وفعليًّا، الطول الموجي لإلكترون - لنقل يقفز من مستوى $n = 2$ إلى $n = 1$ يتناسب عكسيًّا مع $(Z - 1)^2$ بسبب حجب الإلكترون الوحيد الباقي في المستوى $1s$ للنواة. وفي 1914، وجد موسيلي (1887 – 1915) أنّ مخطط $\sqrt{1/\lambda}$ مقابل Z قد أنتج خطًّا مستقيمًا (الشكل 28 – 12). وحُددت قيم Z لعدد من العناصر بمواءمتهم على **مخطط موسيلي** هذا. وقد استند مفهوم العدد الذريّ لموسيلي إلى قاعدة عملية متينة.



الشكل 28 – 12 مخطط $\sqrt{1/\lambda}$ مقابل Z لخطوط أشعة إكس K_α.

المثال 28-6 طول موجة أشعّة إكس

قدِّرِ الطّولَ الموجيَّ للانتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ في الموليبدينيوم $(Z = 42)$. ما طاقة فوتون من هذا النوع؟

النّهج: نستخدم صيغة بور (المعادلة 27 – 16) لـ $1/\lambda$، ونعوّض عن Z^2 بما يلي: $(Z - 1)^2 = (41)^2$.

الحلّ: تعطي (المعادلة 27 – 16)

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{2\pi^2 e^4 mk^2}{h^3 c}\right)(Z - 1)^2\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

مع $n = 2$ و $n'=1$. ونعوض بالقيم:

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^7\,\mathrm{m^{-1}})(41)^2\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{4}\right)$$

$$= 1.38 \times 10^{10}\,\mathrm{m^{-1}}$$

لذلك فإنّ $\lambda = 0.072\,\mathrm{nm}$. وهذا قريب من القيمة المقيسة (الشكل 28 – 11) ومقدارها $0.071\,\mathrm{nm}$. وكلّ من هذه الفوتونات ستمتلك طاقة بدلالة eV:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s})(3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s})}{(7.2 \times 10^{-11}\,\mathrm{m})(1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})} = 17\,\mathrm{keV}$$

إنّ الناتج هو التحويل بين جول والفولت

مثال 28-7 تحديد العدد الذّريّ

استُخدمت فوتونات ذات طاقة عالية لقذف مادة مجهولة. فوُجِد أنّ طاقة أعلى قمة في أشعة إكس المنبعثة هي 66 keV. حدّد هذه المادة.

النّهج: أعلى شدة لأشعة إكس هي غالبًا لخط K_α (انظر الشكل 28 – 11) والتي تحدث عندما تطرد الفوتونات إلكترونات من القشرة K نحو الخارج (الفلك الداخلي العميق، $n = 1$) ولتشغل المواقع بعد ذلك بواسطة إلكترونات من القشرة $L(n = 2)$. نستخدم نموذج بور، ونفترض أنّ الإلكترونات "ترى" شحنة نووية مقدارها $Z = 1$ (غطيت بواسطة إلكترون واحد) بدلا من $Z = 1$.

الحلّ: إنّ انتقال الهيدروجين من $n = 2$ إلى $n = 1$ قد يزوّد بحوالي 10.2 eV (انظر الشكل 27 – 27 أو المثال 27 – 12). تتناسب الطاقة E مع Z^2 (المعادلة 27 – 15)، أو بدلا من ذلك $(Z - 1)^2$ بسبب حجب النواة بواسطة إلكترون واحد في الحالة 1s (انظر إلى الأعلى). ولهذا، نستطيع استخدام النسب:

$$\frac{(Z - 1)^2}{1^2} = \frac{66 \times 10^3\,\mathrm{eV}}{10.2\,\mathrm{eV}} = 6.5 \times 10^3$$

إذن، $Z - 1 = \sqrt{6500} = 81$ و $Z = 82$. وبذلك، فإنّ المادة هي الرّصاص.

وسنحلل الآن – باختصار- الجزء المستمر من طيف أشعة إكس (الشكل 28 – 11) بناءً على نظرية الضوء الفوتونية. عندما تصدم الإلكتروناتُ الهدفَ، فهي تصطدم بذرات المادة لتعطي معظم طاقتها على هيئة حرارة (حوالي 99%). ولهذا، يجب أن تبرّد أنابيب أشعة إكس). وتستطيع الإلكترونات أيضا الاستغناء عن طاقة بانبعاث فوتون ضوئي منها: يبعث إلكترون بطيء بتماسه مع ذرات المادة (الشكل 28 – 13) إشعاعات بسبب هذا التباطؤ (الفصل 22). ويُدعى في هذه الحالة **رمزَ شترالنج** (الكلمة الألمانية "لإيقاف الإشعاعات"). ولأنّ الطاقة محفوظة، فإنّ طاقة الإلكترون المنبعث hf، يجب أن تساوي الخسارة في طاقة الإلكترون الحركية، $\Delta \text{KE} = \text{KE} - \text{KE}'$، ولذلك

$$hf = \Delta \text{KE}$$

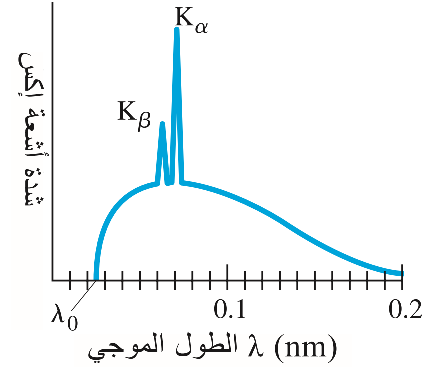
ويمكن للإلكترون أن يخسر طاقته كلّها أو جزءًا منها في تصادم كهذا. ويُفسّرُ طيف أشعة إكس المستمر (الشكل 28 – 11) كنتيجة لتصادمات برمزشترالنج هذه، والتي يفقد خلالها كميات مختلفة من طاقة الإلكترونات. ومن المؤكد أنّ أقصر طول موجي لشعاع إكس (أعلى تردد) هو نتيجة لفقدان الإلكترون طاقته الحركية كلّها لإنتاج فوتون واحد في تصادم وحيد. وبما أنّ طاقة الإلكترون الأولية الحركية تساوي الطاقة التي أعطيت له بواسطة الفولتية المُسرِّعة V، فإنّ $\text{KE} = eV$. وفي التصادم الوحيد الذي نتج منه إيقاف الإلكترون ($\text{KE}' = 0$)، وبذلك $\Delta \text{KE} = eV$ و

$$hf_0 = eV$$

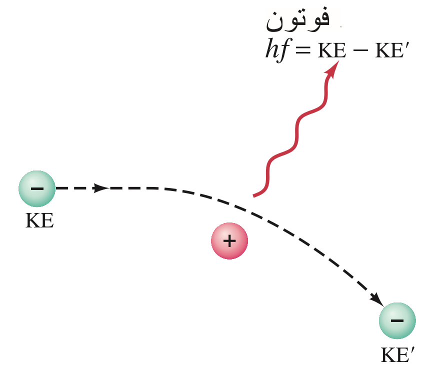
ونضع $f_0 = c/\lambda_0$ حيث λ_0 طول موجة القطع (الشكل 28 – 11) ونجد

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV} \qquad \textbf{(4-28)}$$

ويرتبط هذا التنبؤ في λ_0 تحديدًا مع ما تمّ ملاحظته عمليًّا. وهذه النتيجة دليلٌ إضافيّ على أنّ أشعة إكس هي شكل من الإشعاعات الكهرومغناطيسية (ضوء) وأنّ نظرية الضوء الفوتونية صحيحة.



الشكل 28 – 11 (معادة) طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف موليبدينيوم في أنبوب أشعة إكس المشغل عند 50 kV.



الشكل 28 – 13 فوتون برمشترالنج نتج من تباطؤ إلكترون بسبب تفاعله مع ذرة الهدف.

المثال 8-28 طول موجة القطع

ما أقصر طول موجة لفوتون أشعة إكس منبعث من أنبوب هذه الأشعة الذي يعمل على 50 kV؟

النّهج: ستمتلك الإلكترونات المصطدمة بالهدف طاقة حركية KE مقدارها 50 keV. وأقصر طول موجي للفوتونات ينجم عن تصادمات تعطى خلالها طاقة الإلكترونات الحركية KE جميعها إلى الفوتون فيكون $\text{KE} = eV = hf_0$.

الحلّ: من (المعادلة 28 – 4)،

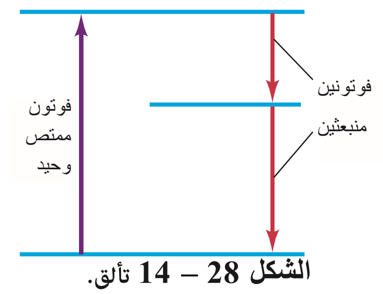
$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})(5.0 \times 10^{4}\,\text{V})} = 2.5 \times 10^{-11}\,\text{m}$$

أو 0.025 nm.

ملحوظة : هذه النتيجة متوافقة جدا مع النتائج العملية (الشكل 28 – 11).

* 10-28 التّألق والتّفسفر

عندما تهيج ذرة من حالة طاقة إلى حالة أعلى بواسطة امتصاص فوتون، فمن الممكن أن تعود إلى الحالة الأخفض في سلسلة من خطوتين (أو أكثر) إذا كان هناك مستوى طاقة بينهما (الشكل 28 – 14). ستمتلك الفوتونات المنبعثة نتيجة لذلك طاقة وترددا أخفض من التي للفوتون الممتص . وعندما يكون الفوتون الممتص في المنطقة فوق البنفسجية، وتكون الفوتونات المنبعثة في المنطقة المرئية من الطيف، فإنّ هذه الظاهرة تدعى **التّألق** (الشكل 28 – 15).



الشكل 28 – 14 تألق.

تطبيق الفيزياء

تحليل التألق ومصابيح ضوئية متألقة.

يعتمد الطول الموجيُّ الذي سيحدث عنده التألق على مستويات الطاقة للذرات المعنية. وبسبب اختلاف الترددات للموادالمختلفة، وبسبب الاستعداد الطبيعي لبعض المواد للتألق أيضًا، فإنّ التألق يُعدّ أداة قوية للتعرف إلى المواد. كما تستخدم أيضًا للمعايرة – تحديد مقدار وجود مادة ما – ولمتابعة المواد على امتداد مساراتها الحيوية الطبيعية في النباتات أو الحيوانات. وللكشف عن مركب ما، يجب أن يكون الضوء المحفز أحاديّ الموجة، ويجب ألّا تتألّق المذيبات أو المواد الأخرى الموجودة في المنطقة نفسها من الطيف. وفي بعض الأحيان، تكون الملاحظة المباشرة للضوء المتألق المنبعث كافية لكشف مركب ما. وفي حالات أخرى، تستخدم أجهزة قياس الأطياف لقياس أطوال الأمواج وشدة الضوء المنبعث.

وتعمل **المصابيح الضوئية المتألقة** من خلال خطوتين؛ يسارع الجهد المطبق الإلكترونات التي تصدم ذرات الغاز في الأنبوب لتهييجها. وعندما تقفز الذرات إلى الأسفل إلى مستوياتها الطبيعية، تبعث فوتونات فوق بنفسجية فتصطدم بالطلاء المتألق على الجدران الداخلية للأنبوب. والضوء الذي نراه ناجٌ من تألق هذه المادة تجاوبا لاصطدام الضوء فوق البنفسجي بها.

تُدعى الموادُ كتلك المستخدمة في أقراص الساعات المضيئة بأنّها **متفسفرة**. وعندما تُرفع ذرّة ما إلى حالة مهيجة (مثارة) طبيعية، فإنّها تسقط عائدة إلى الأسفل خلال حوالي 10^{-8} ثانية. وفي المواد المتفسفرة، تستطيع الذرات أن تثار عن طريق الامتصاص الفوتوني إلى مستويات طاقة تُدعى **شبه مستقرة**، وهي حالات تستمر أطول كثيرًا – حتى إلى عدة ثوانٍ أو أطول. وفي تجمع لتلك الذرات، فإنّ كثيرًا منها سيهبط إلى الحالة الأخفض سريعًا، ولكن هناك الكثير منها أيضًا سيبقى في الحالة المهيجة لمدة تزيد على الساعة.

لذا، فإنّ الضوء سينبعث حتى ولو بعد فترات زمنية طويلة. وعندما تضع مينا ساعتك بالقرب من مصباح مضيء، ستتهيج ذرات كثيرة إلى حالات شبه مستقرة، وتستطيع أن ترى التوهج لمدة طويلة بعد ذلك.

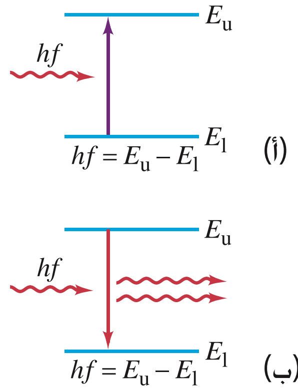


الشكل 28 – 15 عندما يسلط ضوء فوق بنفسجي على هذه الصخور، فإنها ستتألق في المنطقة المرئية من الطيف.

* 11-28 ليزرات

الليزر: جهاز يستطيع أن يبعث شعاعًا ضوئيًا رفيعًا (حادًا) جدًّا مرتفعَ الشدة، أحاديّ طول الموجة ومترابطًا. (ونقصد هنا بالترابط، أنّ أجزاء الشعاع جميعها خلال أيّ مقطع عرضي منه لها الطور نفسه). ويُعدّ الشعاع المنبعث موجة مستوية مثالية تقريبًا. وعلى الوجه الآخر، فإنّ مصدرًا ضوئيًا عاديًا يبعث الضوء في الاتجاهات جميعها (لذلك، فإنّ الشدة تتناقص بسرعة مع المسافة)، والضوء المنبعث غير مترابط (الأجزاء المختلفة من الشعاع ليس لها الطور نفسه مقارنة ببعضها بعضًا). وتعمل الذرات المهيجة التي تبعث الضوء من مصباح ضوئيّ اعتيادي باستقلالية. لذا، يمكن اعتبار كلّ فوتون منبعث قطارًا موجيًّا قصيرًا، طوله 30 سم في العادة، ويدوم 10^{-8} ثانية. ولا ترتبط القطارات الموجية هذه بأيّ علاقة طورية مع بعضها بعضًا. والعكس صحيحٌ تمامًا بالنسبة إلى الليزرات.

يعتمد عمل الليزر على النظرية الكمية. ولقد رأينا إمكانية امتصاص ذرة لفوتون إذا (وإذا فقط) كانت طاقته hf تساوي فرق الطاقة بين مستوى طاقة ذرة مأهول من جهة وحالة مهيجة متوافرة من جهة أخرى (الشكل 28 – 16أ). وإذا كانت الذرة في الحالة المهيجة، فمن الممكن أن تقفز تلقائيًا (دون تحفيز) إلى الحالة الأخفض مع انبعاث فوتون. ورغم ذلك، إذا صدم فوتونٌ بهذه الطاقة نفسها بالذرة المهيجة، فيمكن له أن يحفز الذرة على القيام بانتقال أبكر إلى الحالة الأخفض (الشكل 28 – 16ب). وتدعى هذه الظاهرة **الانبعاثَ المُحفّز**: ليس فقط أنّ الفوتون الأصلي لا يزال موجودا، بل أيضا لوجود فوتون آخر له التردد نفسه نتج من انتقال الذرة. وهذان الفوتونان لهما الطور نفسه تماما، ويتحركان في الاتجاه نفسه كذلك. وهذه هي الطريقة التي ينتج بها الضوء المترابط في الليزر. ولذلك، فإنّ المصطلح **ليزر** ناتج من تجميع الأحرف الأولى من الكلمات المشيرة باللغة الإنجليزية إلى تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المحفّز للإشعاع.

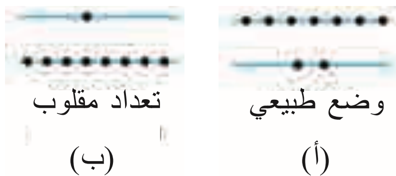


الشكل 28 – 16 (أ) امتصاص فوتون. (ب) انبعاث محفز. تشير E_u و E_l إلى طاقة حالات "علوية" و"سفلية" على الترتيب.

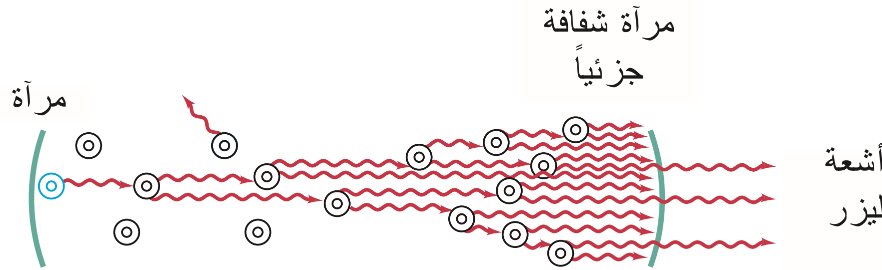
انبعاث مُحفز.

ومن الطبيعي أن تكون معظم الذرات في الحالة الأخفض، وبذلك سيتمّ امتصاص غالبية الفوتونات الساقطة. وللحصول على الضوء المترابط من الانبعاث المحفز؛ يجب أن يتحقق شرطان هما: 1- يجب أن تثار الذرات إلى الحالة الأعلى لكي يُنتج **تعدادٌ مقلوب**، ذلك الذي يكون عنده عدد الذرات في الحالة الأعلى أكبر من عددها في الحالة الأخفض (الشكل 28 – 17). وعندها، سيطغى انبعاث الفوتونات على الامتصاص. 2- يجب أن تكون **الحالة** الأعلى **شبه مستقرة**، أي تبقى عندها الإلكترونات لفترة زمنية أطول من المعتاد* ليحدث نتيجة ذلك الانتقال إلى الحالة الأخفض بواسطة الانبعاث المحفز بدلا من التلقائية.

الشكل 28 – 17 مستويا طاقة لتجمع ذرات. كلّ نقطة تمثل طاقة حالة لذرة واحدة. (أ) وضع طبيعي. (ب) تعداد مقلوب.



* يمكن لذرة مهيجة أن تهبط إلى حالة كتلك، ويمكنها أن تقفز إلى حالة أخفض فقط عن طريق ما يُسمّى الانتقال الممنوع (نوقش في البند 28 – 6). ويفسّر هذا السبب وراء ديمومتها فترة أطول من الوضع الطبيعي.



الشكل 28 – 18 رسم ليزري، يظهر ذرات مهيجة محفزة لتبعث ضوءًا.

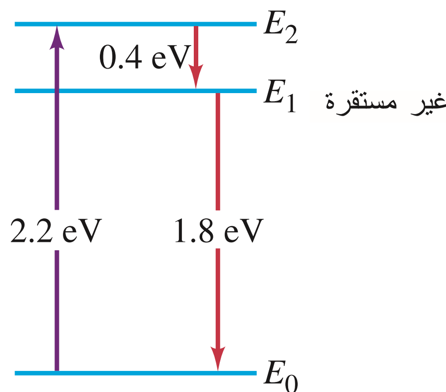
(الشكل 28 – 18) رسم تخطيطي لليزر: وُضعت المادة "الليزرية" في أنبوب طويل رفيع يحتوي على مرآتين عند نهايته. إحداهما شفافة جزئيًّا (تسمح بمرور 1 أو 2% فقط من الضوء الساقط عليها). تهبط بعض الذرات المهيجة إلى الأسفل بسرعة نوعًا ما بعد تهيجها. واحدة منها هي الذرة الزرقاء المبينة في أقصى يسار (الشكل 28 – 18). وإذا اصطدم الفوتون المنبعث بذرة أخرى في الحالة المهيجة. فسيعمل ذلك على تحفيزها لتبعث فوتونا متوافقا معه في الطور. وله التردد نفسه. ويتحرك في الاتجاه نفسه. وليتحرك بعد ذلك الفوتونان فيصدما ذرات أخرى ويتسببا بانبعاث محفز إضافيٍّ. ومع استمرار العملية. يتضاعف عدد الفوتونات. وعند اصطدام الفوتونات بالمرآتين الطرفيتين. ينعكس معظمها عائدًا. وبينما تتحرك عائدة في الاتجاه المعاكس. تستمر بتحفيز ذرات إضافية لتبعث فوتونات. وبينما تتحرك الفوتونات جيئة وذهابا بين المرآتين. تمُرّ نسبة صغيرة منها خلال المرآة جزئية الشفافية عند أحد الطرفين. وتكوّن هذه الفوتوناتُ شعاعَ الليزر الخارجيّ المتطابق الرفيع*. وفي الليزر المصمم جيدا. فإنّ انتشار الشعاع لا يحصره إلا الحيود . ولهذا. فإنّ الانتشار الزاوي هو $\approx \lambda/D$ (انظر المعادلة 24 – 3 أو 25 – 7) حيث D هي قطر المرآة الطرفية. ويمكن للانتشار الحيودي أن يكون صغيرًا بصورةٍ هائلة. وتوجّه طاقة الضوء في شعاع رفيع كقلم رصاص، بدلًا من انتشارها في الفضاء كما تفعل مصادر الضوء العادية.

*تصميم تعداد مقلوب

ليزر ياقوتي

يمكن تحقيق إثارة الذرات في الليزر بطرق عدة لإنتاج التعداد المقلوب الضروري. وفي الليزر الياقوتي، تتكون المادة الليزرية من عمود ياقوتي يتكون من Al_2O_3 مضافا إليها نسبة صغيرة من ذرات كروم (Cr) التي تحلّ محل ذرات من (Al)؛ ذرات Cr هي صاحبة العلاقة بعمل الليزر. وفي عملية تدعى **الضخّ البصري**، تهيّج الذرات بواسطة ومضات قوية من ضوء ذي طول موجة 550 nm، وطاقة فوتونية مقدارها 2.2 eV. وكما هو مبين في (الشكل 28 – 19). أثيرت الذرات من الحالة E_0 إلى الحالة E_2. وتسقط الذرات بسرعة عائدة إلى E_0 أو إلى الحالة المتوسطة E_1، وهي شبه مستقرة، وذات عمر يقارب 3×10^{-3} s (بالمقارنة مع 10^{-8}s للمستويات العادية). ومع عملية الضخّ الشديد. يمكن العثور على ذرات إضافية في الحالة E_1 أكثر من الحالة E_0. وعندها نكون قد حصلنا على التعداد المقلوب والمطلوب لعمل الليزر. وفي اللحظة التي تقفز عندها ذرات قليلة من الحالة E_1 إلى E_0، ينبعث منها فوتونات تنتج انبعاثًا محفّزًا من الذرات الأخرى، ليبدأ عندئذ عمل الليزر. وبذلك ينبعث من الليزر الياقوتي شعاع طاقة فوتوناته 1.8 eV، وطوله الموجي 694.3 nm (أو ضوء "ياقوتي – أحمر").

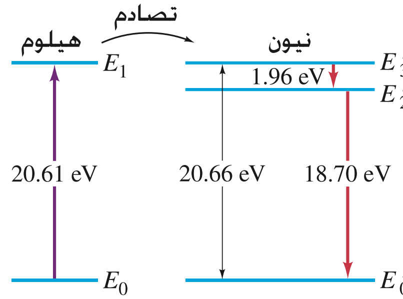
* داخل الأنبوب، بعض الفوتونات المنبعثة تلقائيًّا ستنبعث بزاوية ما بالنسبة إلى المحور، وستخرج هذه الفوتونات دون شك من جانب الأنبوب، ولن تؤثر في مدى رفع الشعاع الرئيس.



الشكل 28 – 19 مستويات طاقة الكروم في بلورة ياقوت. فوتونات طاقتها 2.2 eV "تدفع" الذرات من E_0 إلى E_2 والتي "تضمحل" تهوي بعد ذلك إلى الحالة غير المستقرة E_1. ويحدث عمل الليزر بانبعاث فوتوني محفز بالانتقال من E_1 إلى E_0.

هيليوم-نيوتن ليزر

يُستخدم الغاز كمادة ليزريّة في ليزر الهيليوم – نيون (He–Ne). وهي خليطٌ من حوالي He 85% و Ne 15%. وتهيّج الذرات بتطبيق جهدٍ عالٍ على الأنبوب ليحدث تفريغ كهربائي خلال الغاز. وفي هذه العملية، ترقى بعض ذرات He إلى الحالة شبه المستقرة E_1 المبينة في (الشكل 28 – 20). والتي تعود إلى قفزة بمقدار 20.61 eV، وتساوي تقريبًا حالة مثارة في النيون، 20.66 eV. ولا تعود ذرّات He بسرعة إلى الحالة الأرضيّة بانبعاث تلقائي. وبدلًا من ذلك، تعطي طاقتها الفائضة إلى ذرة Ne عند تصادمها عادة (انظر الشكل 28 – 20). وفي تصادم كهذا، تسقط He إلى الحالة الأرضية، وتهيّج ذرة Ne إلى الحالة E'_3 (تشير الفتحة المائلة إلى حالات النيون). والاختلاف البسيط في الطاقة (0.05 eV)أضيف بواسطة الطاقة الحركية للذرات المتحركة. وبهذه الطريقة، تصبح الحالة E'_3 في النيون – وهي شبه مستقرة – مأهولة أكثر من المستوى E'_2. إنّ التعداد المقلوب بين E'_3 و E'_2 هو المطلوب لعمل الليزر.



(الشكل 28 – 20) مستويات طاقة He و Ne. أثير He في التفريغ الكهربائي إلى الحالة E_1. ونقلت هذه الطاقة إلى مستوى E'_3 من النيون بالتصادم. E'_3 شبه مستقرة وتضمحل إلى E'_2 بالانبعاث المحفز.

أمثلة ليزر أخرى:
كيميائية
أصباغ
CO_2
اشباه الموصلات
(تقاطعات pn)

تتضمّن أنواع الليزرات الأخرى ما يلي: الليزرات الكيميائية التي تحصل على طاقتها المدخلة من التفاعل الكيميائي للغازات نشطة التفاعل، والصبغات الليزرية التي يمكن التحكم بترددها، وليزرات غاز CO_2 التي تستطيع إنتاج قدرة عالية في المنطقة تحت الحمراء، وليزرات الحالة الصلبة من عناصر الأرض النادرة مثل ليزر Nd:YAG العالي القدرة، والليزر الصمام الثنائي شبه الموصل، والذي يُدعى أيضا الليزر الوصليّ *pn* الذي يحدث الانتقال خلاله بين أسفل حزمة الإيصال وأعلى جزء في حزمة التكافؤ (البند 29 – 6). ويستخدم هذا النوع(شبه الموصل) لقراءة الأقراص المضغوطة (CD)، والأقراص الرقمية (DVD) (انظر إلى الأسفل).

ويمكن تهييج الذرات في الليزر بطريقة مستمرة أو على شكل نبضات. ففي **الليزر النّبضيّ**، تهيج الذرات بواسطة طاقة يتمّ ادخالها دوريًا. أمّا في **الليزر المستمر**، فتكون الطاقة المدخلة مستمرة. وعند تحفيز الذرات لتقفز إلى المستوى الأخفض، يتمّ إثارتها بسرعة لتعود إلى المستوى الأعلى لكي يكون الناتج شعاعًا ليزريًّا مستمرًا. إنّ الليزر لا يُعدّ مصدرًا للطاقة. لذا، يجب إدخال الطاقة كي يعمل الليزر على تحويل جزءٍ منها إلى شعاعٍ ناتجٍ رفيع عالي الشدة.

تنويه !
الليزر ليس مصدرًا للطاقة.

* تطبيقات

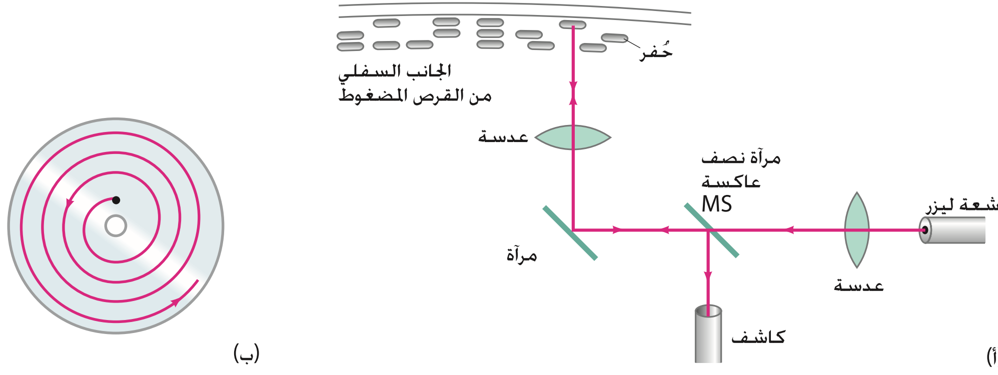
تطبيق الفيزياء
استعمالات الليزر الطبية وغيرها

بسبب الخصائص المميزة لضوء الليزر، كشعاع رفيع مترابط (متماسك)، فقد وجد له تطبيقات عديدة: فهو أداة جراحية مفيدة، يمكن استخدامها لتدمير أغشية في مناطق موضعية، أو لتفتيت حصى الصفراوية وحصى الكلى. وبسبب الحرارة المنتجة، يمكن استخدام شعاع الليزر لِلَأْمِ الأغشية المتقطعة ووصلها، مثل شبكية العين المنفصلة. ويمكن حمل الشعاع الليزري بواسطة ليف بصري (البند 23 – 6) إلى النقطة الجراحية، وفي بعض الأحيان كمسار لليف بصري إضافي على المنظار الداخلي (الشكل 28 – 21 انظر أيضا البند 23 – 6) لإزالة الترسبات المسببة لانسداد الشرايين البشرية على سبيل المثال، وتدمير أجزاء عضوية ضئيلة داخل خلايا حية باستخدام الليزرات بواسطة باحثين يدرسون تأثير اختفاء هذه الأجزاء في تصرفات الخلايا. وتستخدم أشعة الليزر كذلك لتدمير الخلايا السرطانية وقبل السرطانية، وتُلْئِمُ الحرارةُ الأوعيةَ الشعرية واللمفاوية، لتكوي الجراح فتمنع انتشار المرض.

الشكل 28 – 21 ليزر يتمّ استخدامه في جراحة العيون.



تستخدم الحرارة الشديدة المنتجة في مساحة صغيرة بالليزر للحام الفلزّات وتصنيعها . ولحفر ثقوب ضئيلة في المواد القاسية. ولأنّ شعاع الليزر مترابط، وأحادي الطول الموجي، ورفيع، ومتماثل بشكل أساسي، فيمكن استخدام العدسات لتركيز الضوء على مساحات صغيرة أصغر من ذلك بكثير. ومن الجدير بالذكر أنّ دقة الامتداد الطولي لليزر جعلته مفيدا للمسّاحين، في ترتيب الآلات بإتقان خصوصا في المناطق التي يصعب الوصول إليها.



الشكل 28 – 22 (أ) قراءة قرص مضغوط (أو قرص الفيديو الرقمي). الشعاع الدقيق لليزر، المركز أكثر بواسطة العدسات، موجه إلى السطح السفلي لقرص مضغوط دوار. وينعكس الشعاع مرتدًا من المناطق بين الحفر وينعكس بدرجة أقل بكثير من الحفر. والضوء المنعكس يقاس كما هو مبين، منعكسًا من مرآة نصف عاكسة MS. ويمثّل الانعكاسان القوي والضعيف المرتبطان بالأصفار (0s) والآحاد (1s) من الشفرة الثنائية إشارة صوتية أو صورية. (ب) يتبع الليزر مسار CD الذي يبدأ قرب المركز ويتحرك بصورة لولبية نحو الخارج.

تطبيق الفيزياء
قارئ CD و DVD، شفرات عمودية

وفي الحياة اليومية، تستخدم الليزرات لقراءة شفرات أشرطة الترميز bar-code (أو الدفع). وفي الأقراص المضغوطة (CD)، وأقراص الفيديو الرقمية (DVD). وينعكس شعاع الليزر عن الحززات والفراغات لشفرة العمود. وعن صفر CD أو DVD كما هو مبين في (الشكل 28 – 22أ). والمعلومات المسجلة على CD أو DVD هي سلسلة من الحفر والفراغات الممثلة لـ 0s و 1s (أو "مغلق" و"مفتوح") لشفرة رقمية يفكّ تشفيرها إلكترونيًّا قبل إرسالها إلى النظام الصوتي أوالمرئي. ويبدأ ليزر قارئ القرص المضغوط CD بقراءة القرص من الداخل، حيث يبدأ بالدوران بسرعة 500 rpm. ومع دوران القرص، يتبع الليزر المسار اللولبي (الشكل 28 – 22ب). ومع حركته نحو الخارج، تقل سرعة القرص لأنّ كلّ محيط جديد $(C = 2\pi r)$ يعدّ أطول بقليل من سابقه نتيجة ازدياد r. ويدور القرص قرب الحافة الخارجية بمعدل 200 rpm. إنّ طول مسار القرص المضغوط CD الذي مدته ساعة واحدة هي 5 km تقريبًا، في حين يكون عرض مساره $1600\ nm\ (= 1.6\ \mu m)$ تقريبًا. أمّا المسافة بين الحفر فهي حوالي 800 nm. وتحتوي أقراص DVD على معلومات أكثر من ذلك بكثير. وهي تعتمد على تقنية حديثة جدًا، ويمكن لها أن تستخدم مسارا أرفع $(0.7\ \mu m)$ وطولاً أقصر (400 nm) . وهذه الأرقام هي لأقراص DVD معيارية). والنسخ الحديثة تستخدم الليزر الأزرق بأطوال أمواج أقصر (405 nm) وشعاع أرفع. فتسمح بمسارات أرفع $(0.3\ \mu m)$ لتستطيع تخزين بيانات أكثر بكثير من أجل الحصول على تعريفٍ عالٍ.

ويمكن لأقراص DVD أن تحتوي على طبقتين، واحدة تحت الأخرى. وعندما يركز الليزر على الطبقة الثانية، فإنّ الضوء يمرّ خلال الطبقة السطحية شبه الشفافة. ومن الممكن أن تتمّ قراءة الطبقة الثانية من الحافة الخارجية بدلًا من الداخلية. ويمكن لأقراص DVD أيضا أن تضم طبقة أو طبقتين على سطحي القرص.

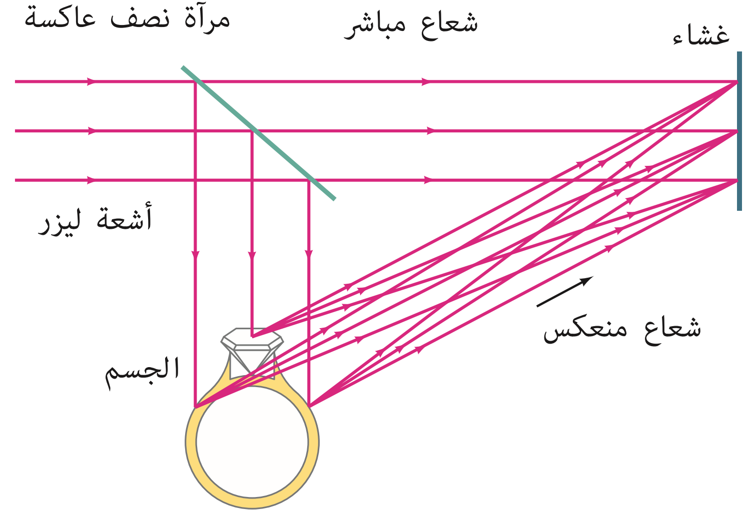
12-28 التصوير التّجسيميّ

تطبيق الفيزياء
تصوير تجسيمي

يُعدّ إنتاج صور ثلاثية الأبعاد - **الصّور المجسّمة** - (انظر الشكل 28 – 23) أحد أكثر تطبيقات ضوء الليزر إثارة. وفي الصورة العادية، يسجل الفيلم ببساطة شدة الضوء الواصل إليه عند كلّ نقطة . وعندما يشاهد الرسم الصوري أو الشفاف، فإنّ الضوء المنعكس عنه أو المار خلاله يمنحنا صورة ثنائية الأبعاد. أما في التصوير التجسيمي، فتبنى الصور بالتداخل دون عدسات. وعند تشكل الصورة المجسمة الليزرية على غشاء، فإنّ شعاعًا ليزريًّا موسّعاً يكون قد انشطر إلى جزأين بواسطة مرآة نصف فضية (الشكل 28 – 23أ). فيذهب جزء منه إلى الغشاء مباشرة، في حين يمرّ الباقي إلى الجسم المراد تصويره، لينعكس عنه بعد ذلك إلى الغشاء. يصل الضوء الصادر من النقاط جميعها على الجسم إلى كلّ نقطة على الغشاء، ويسمح تداخل الشعاعين تسجيل كلّ من الشدة والطور النسبي للضوء عند كلّ نقطة. ومن الضروري أن يكون الضوء متوافقا – أي أنّ له الطور نفسه عند النقاط جميعها– ولهذا السبب تمّ استخدام الليزر.



(ب)



(أ)

الشكل 28 – 23 (أ) صناعة الصور المجسمة. يتداخل الضوء المنعكس من النقاط المختلفة على الجسم (عند الغشاء) مع الضوء من الشعاع المباشر. (ب) ولدٌ ينظر إلى الصورة المجسمة لسيدتين تتكلمان بهاتفين.

وبعد تطوير الغشاء، يوضع مرّةً أخرى في شعاع ليزري لتصنع للجسم صورة ثلاثية الأبعاد. وتستطيع أن تمشي حول صورة من هذا النوع، وتراها من جوانب مختلفة كما لو أنّها الجسم الأصلي (الشكل 28 – 23ب). ومع هذا، فلو حاولت أن تلمسها بيدك، فلن تجد أيّ مادة هناك.

صور مجسمة ذات ضوء أبيض

إنّ الصّور **المجسّمة الحجميّة** أو **ذات الضّوء الأبيض** لا تحتاج إلى ليزر لرؤيتها، ولكن يمكن رؤيتها باستخدام ضوء أبيض عادي (ويفضل الأقرب لمصدر نقطي، مثل الشّمس أو مصباح نظيف ذي فتيلة صغيرة براقة). وعلى الرغم من هذا، يجب أن تكوّن الصورة المجسمة كتلك باستخدام ليزر. وهي لا تحضّر على غشاءٍ رقيقٍ، ولكن على مستحلبٍ سميك. إنّ نمط التداخل في الغشاء المستحلب يمكن التفكير به كمجموعة مرتبة من الحزم أو الأشرطة حيث يمكن للتداخل البناء أن يحدث. المجموعة المرتبة هذه، وعملية إعادة بناء الصورة، يمكن مقارنتها مع استطارة براغ لأشعة إكس من الذرات في البلورة (انظر البند 25 – 11). ويستطيع الضوء الأبيض إعادة بناء الصورة لأنّ شرط براغ $(m\lambda = 2d\sin\theta)$ يختار الطول الموجي الوحيد المناسب. وإذا كانت الصورة المجسمة قد تمّ تحضيرها في الأصل من ليزرات تنبعث منها الألوان الثلاثة الأولية التجميعية (الأحمر، والأخضر، والأزرق)، فعندئذٍ يمكن رؤية الصورة ثلاثية الأبعاد بالألوان الكاملة عند مراقبتها باللون الأبيض.

ملخص

وضع شرودنجر وهايزنبيرغ كلّ على حدة نظرية جديدة اسمها **النّظريّة الكمّيّة** في عام 1925، وهي تُعدّ حاليًّا النظرية الأساس على المستوى الذرّي. كما أنّها نظرية إحصائية احتمالية أكثر منها حتمية.

هناك جانبٌ مهمٌّ من الميكانيكا الكمية يُدعى **مبدأ عدم اليقين** لهايزنبيرغ. وهو ناتج من ازدواجية الموجة — الجسيم، والتفاعل غير الممكن تلافيه بين الجسيم الملاحَظ والملاحِظ (المُراقِب).

ينصّ أحد أشكال مبدأ اللاحتمية على عدم إمكانية قياس موضع جسم ما x وزخمه p_x بدقة في الوقت نفسه. وأنّ حاصل ضرب حدّيّ عدم اليقين $(\Delta x)(\Delta p_x)$ لا يمكن أن يكون أقل من $\hbar\ (= h/2\pi)$:

$$(\Delta p_x)(\Delta x) \gtrsim \hbar \qquad (1-28)$$

كما أنّ هناك شكلًا لمبدأ عدم اليقين ينصّ على إمكانية أن يكون مقدار عدم اليقين في الطاقة هو ΔE لفترة زمنية Δt، أي

$$(\Delta E)(\Delta t) \gtrsim \hbar \qquad (2-28)$$

وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ حالة إلكترون ما في ذرة ما تحدّدُ بأربعة **أعداد كمّيّة هي**: n, l, m_l و m_s:

(1) n **العدد الكمّيّ الأساس**: يمكن أن يأخذ قيمة أيّ عددٍ صحيح $(1,\ 2,\ 3,\cdots)$ ويتماثل مع العدد الكمّيّ في نظرية بور القديمة؛

(2) l، العدد الكمّيّ الفلكيّ (المداري): يمكن أن يأخذ قيما بين 0 و $n-1$؛

(3) m_l، **العدد الكمّيّ المغناطيسيّ**: يمكن أن يأخذ قيم أعداد صحيحة من $-l$ إلى $+l$؛

(4) m_s، **العدد الكمّيّ المغزليّ**: يمكن أن يكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$.

تعتمد مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين على n، في حين تعتمد في الذرات الأخرى على n و l. وعند تطبيق مجال مغناطيسي خارجي، تنشطر الأطياف الخطية (**تأثير زيمان**) مشيرة إلى اعتماد الطاقة على m_l في هذه الحالة أيضا.

وحتى عند غياب المجال المغناطيسيّ، فإنّ الأقيسة الدقيقة للأطياف الخطية تظهر انشطارًا ضئيلًا في الخطوط يُدعى **التركيب الدقيق**، الذي يعني أنّ الطاقة تعتمد بشكل قليل جدًّا على m_l و m_s.

[* الانتقالات بين الحالات التي تتبع قاعدة الانتقاء $\Delta l = \pm 1$ هي ذات احتمالية أعلى بكثير من تلك المسماة بالانتقالات "الممنوعة"].

إنّ ترتيب الإلكترونات في الذرات متعددة – الإلكترونات يحكمه **مبدأ باولي للاستبعاد**. وهذا المبدأ ينصّ على عدم قدرة أيّ إلكترونين على احتلال الحالة الكمية نفسها؛ أي أنّهما لا يمكن أن يمتلكا مجموعة الأعداد الذرية نفسها: n, l, m_l و m_s.

وفي النتيجة، تجمع الإلكترونات في الذرات عديدة الإلكترونات في **قشور** (مستويات الطاقة) (حسب قيمة n) **وقشور فرعية** (مستويات طاقة فرعية) (حسب l).

تحدد التركيبات الإلكترونية باستخدام القيم العددية لـ n، وباستخدام أحرف s, p, d, f :l، إلخ . عندما تكون قيم $l = 0, 1, 2, 3,$ وهكذا دواليك، إضافة إلى رمزٍ علويّ لعدد الإلكترونات في القشرة الفرعية. ولهذا، فالحالة الأرضية للهيدروجين هي $1s^1$، أمّا للأكسجين فهي $1s^2 2s^2 2p^4$.

الجدول الدّوريّ: تُرتّبُ العناصر في صفوف أفقية حسب ازدياد العدد الذّريّ (عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة). وتركيب القشرة يترتب عليه دورية في خصائص العناصر، ليستطيع كلّ عمود رأسي أن يحتوي على عناصر لها الخصائص الكيميائية نفسها.

يتمّ إنتاج أشعة إكس التي هي نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي طوله الموجي قصير جدًّا، عندما تصطدم إلكترونات عالية السرعة بهدف ما. و يتكون طيف أشعة إكس المنتج بهذه الطريقة من جزأين هما: 1- طيف مستمر يتمّ إنتاجه نتيجة لتباطؤ الإلكترونات بواسطة ذرات الهدف. 2- قمم تمثل الفوتونات المنبعثة من ذرات الهدف بعد إثارتها بالتصادمات مع الإلكترونات عالية السرعة. وتسمح أقيسة هذه القمم بتحديد مستويات الطاقة الداخلية للذرات وتحديد Z.

[* **التّألق:** يحدث عندما يتبع امتصاص الفوتونات فوق البنفسجية انبعاث ضوء مرئيّ ناتج من الترتيب الخاص لمستويات طاقة المادة. والمواد **المتفسفرة** لها حالات **شبه مستقرة** (تعيش طويلا) ينبعث منها الضوء بعد ثوان أو دقائق من امتصاص الضوء].

[* تنتج **الليزرات** شعاعًا رفيعًا من ضوءٍ أحادي طول الموجة ومتوافق (أمواج ضوء لها الطور نفسه). **الصور المجسّمة** هي صور ذات نوعية ثلاثية الأبعاد، تتشكل نتيجة تداخل ضوء الليزر].

أسئلة

1. قارن موجة مادية Ψ مع: (أ) موجة على حبل. (ب) موجة كهرومغناطيسية EM. ناقش التشابهات والاختلافات.
2. فسّر سبب عدم توافق نظرية بور للذرة مع الميكانيكا الكمية، خصوصا مبدأ الاستبعاد.
3. فسّر لماذا كلما زادت كتلة الجسم، أصبح من السهل أكثر التنبؤ بموضعه المستقبلي.
4. من وجهة نظر مبدأ عدم اليقين، لماذا يبدو موضع كرة البيسبول وسرعتها معرفين جيّدًا، في حين لا يكون كذلك للإلكترون؟
5. هل من الممكن بأيّ شكل توازن إبرة حادة جدّا على رأسها تمامًا؟ فسّر.
6. وُضِعَ ميزانُ حرارة بارد في وعاء حساءٍ ساخن. هل ستبقى قراءة درجة حرارة ميزان الحرارة كدرجة حرارة الحساء نفسها قبل أخذ القراءة؟ فسّر.
7. هل يضع مبدأ عدم اليقين حدًّا لمدى جودة أخذك لأيّ قياس منفردٍ للموضع؟
8. إذا علمت موضع جسم بالتحديد، بلا أيّ عدم يقين، فما هي دقة معرفتك لزخمه؟
9. عند تفحصك لضغط عجل حافلة، هل من الممكن أن يتلاشى هروب الهواء؟ هل تستطيع منع تسرب الهواء خلال أخذ القراءة؟ ما علاقة هذا بمبدأ عدم اليقين؟
10. لقد قيل بأنّ طاقة الحالة الأرضية في ذرة الهيدروجين يمكن معرفتها بالتحديد، ولكن الحالات المهيجة يرتبط بقيمها بعض عدم اليقين ("اتساع الطاقة"). هل هذا متطابق مع مبدأ عدم اليقين في شكل طاقتها ؟ فسّر.
11. أيّ النموذجين لذرة الهيدروجين الذي يتنبأ بأنّ الإلكترون يقضي وقتا أطول بالقرب من النواة: نموذج بور أم النموذج الميكانيكي الكميّ ؟
12. تتغير أحجام الذرات ثلاث مرّات تقريبًا من الأكبر إلى الأصغر، ومع هذا فعدد الإلكترونات يتغير من واحد إلى أكثر من مئة. فسّر.
13. ذرتا هيدروجين وهيليوم مهيجتان تشعان ضوءًا عندما تقفزان إلى الأسفل إلى الحالة $n = 1,\ l = 0,\ m_l = 0$. ومع هذا فالعنصران لهما طيفا انبعاث مختلفان تمامًا. لماذا؟
14. كيف كان سيبدو الجدول الدوري لو كانت الميكانيكا الكمية لا تزال صحيحة بالرغم من عدم وجود غزل إلكتروني؟ خذ بالحسبان أوّل عشرين عنصرًا أو أكثر.
15. أيّ من التراكيب الإلكترونية التالية غير مسموحة: (أ) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$ (ب) $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$. أو (جـ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5 4s^2 4d^5 4f^1$؟ إذا كانت غير مسموحة، ففسّر السبب.
16. أعط التركيب الإلكتروني الكامل لذرة يورانيوم (اقرأ الجدول الدوري على الغلاف الخلفي الداخلي بدقة لمساعدتك).
17. في أيّ عمودٍ من الجدول الدوري يمكن أن تتوقع أن تجد الذرة المرتبطة بكلّ من التراكيب الإلكترونية التالية: (أ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$. (ب) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. (جـ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$. (د) $1s^2 2s^2 2p^5$؟
18. لماذا يظهر كلّ من الكلور واليود خصائص متشابهة؟
19. فسّر لماذا يظهر البوتاسيوم والصوديوم خصائص متشابهة؟
20. طاقة التأين للنيون ($Z = 10$) هي، $21.6\,\mathrm{eV}$، وتلك للصوديوم ($Z = 11$) هي $5.1\,\mathrm{eV}$. فسّر الفرق الكبير.
21. * لماذا يوحي طول موجة القطع في (الشكل $28 - 11$) بالطبيعة الفوتونية للضوء؟
22. * لماذا لا نتوقع توافقًا مثاليًّا بين القيم المقيسة لأطوال الأمواج الخطية لأشعة إكس وتلك المحسوبة باستخدام نظرية بور، كما في (المثال $28 - 6$)؟
23. * كيف يمكن أن تستخلص أيّ الخطوط في طيف أشعة أكس يرتبط بانتقالات K_α، K_β، L، إلخ؟

24. لماذا نتوقع من الانتقالات العميقة داخل ذرة ما أن تنتج أطوال أمواج أقصر مقارنة مع انتقالات الإلكترونات الخارجية؟

*25. قارن بين الانبعاثين: التلقائي والمحفز.

*26. كيف يختلف الضّوء الليزريّ عن الضوء العادي؟ وكيف يتشابهان؟

*27. فسّر كيف يمكن أن يبدو شعاع ليزريّ بقدرة 0.0005 W، تمّ تصويره عن بعد، أكثر قوة من مصباح شارع قدرته 1000 W عند المسافة نفسها.

*28. هل تتناقص شدة ضوء الليزر مع التربيع العكسي للمسافة؟ فسّر.

مسائل

28 – 2 دالة موجيّ. شقّ مزدوج

1. (II) النيوترونات في شعاع متواز، الطاقة الحركية لكلّ منها $\frac{1}{40}$ eV ، وُجّهت خلال شقين مزدوجين يفصل بينهما 0.50 nm كم ستبتعد قمم التداخل عن بعضها على شاشة بعيدة 1.0 m؟ [*مساعدة*: أوجد أولًا الطول الموجي للنيوترون].

2. (II) رصاصات، كتلة كلّ منها 3.0 g أطلقت في مسارات متوازية بسرعات 220 m/s خلال ثقب قطره 3.0 mm. ما هو البعد عن الثقب الذي يجب أن تكون عنده لتقيس قطر انتشار شعاع الرصاصات 1.0 cm؟

28 – 3 مبدأ عدم اليقين

3. (I) يسير بروتون بسرعة $(6.560 \pm 0.012) \times 10^5$ m/s. ما أعلى دقة ممكنة في حساب موقعه؟ [*مساعدة*: $\Delta p = m\,\Delta v$].

4. (I) إذا كان بالإمكان قياس موضع إلكترون لدقة 2.0×10^{-8} m، فإلى أيّ دقة يمكن معرفة سرعته؟

5. (I) يبقى إلكترون في الحالة المهيجة لذرة ما لمدة 10^{-8} s. ما أقلّ عدم يقين في طاقة هذه الحالة (بدلالة eV)؟

6. (I) البوزون Z^0، المكتشف في 1985، هو الوسيط للقوة النووية الضعيفة، ومن الطبيعي أن يضمحل بسرعة كبيرة. ومتوسط طاقته السكونية هي 91.19 GeV ، ولكن قصر عمره يظهر كعرض ضمني مقداره 2.5 GeV (عدم يقين في الطاقة السكونية). ما عمر هذا الجسيم؟

7. (II) ما عدم اليقين في كتلة ميون (m = 105.7 MeV/ c^2)، معرفة بدلالة eV/c^2، إذا كان عمره المعطى هو 2.20 μs؟ [*مساعدة*: $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$].

8. (II) نيوترونٌ حُرّ ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) عمره النصفي 900 ثانية . ما عدم اليقين في كتلته (بالكيلو غرام)؟

9. (II) إلكترون وكرة بيسبول (كتلتها 140 kg) يسيران بسرعة 150 m/s قيسا بدقة 0.055%. احسب وقارن عدم اليقين في موقع كلّ منهما.

10. (III) قدّر أدنى طاقة ممكنة لنيوترون موجود في نواة عادية نصف قطرها 1.0×10^{-15} m. [*مساعدة*: يستطيع الجسيم أن يمتلك طاقة مساوية، على الأقل، لعدم اليقين في قيمتها].

11. (III) استخدم مبدأ عدم اليقين لتظهر أنّه إذا وُجِدَ إلكترونٌ في النواة ($r \approx 10^{-15}$ m) فإنّ طاقته الحركية (استخدم النسبية) ستكون مئات من MeV. (وبما أنّ إلكترونا كهذا لم يلاحظ، فإننا نستنتج بأنّ الإلكترونات لا تكون في النواة). [*مساعدة*: يستطيع الجُسيم أن يمتلك طاقةً مساويةً، على الأقل، لعدم اليقين في قيمتها].

12. (III) ما الدقة التي يمكن أن يُقاس بها موضع إلكترون جهده 3.00 keV مفترضًا أن طاقته معروفة إلى 1.00%؟

28 – 6 إلى 28 – 8 الأعداد النووية، مبدأ الاستبعاد

13. (I) ما قيم l الممكنة عند n=6 ؟

14. (I) ما قيم m_l و m_s الممكنة عند n = 5 وl = 3؟

15. (I) كم عدد الإلكترونات الممكنة في n=6، و l =3؟

16. (I) كم عدد الحالات المختلفة الممكن وجودها في القشرة الفرعية لإلكترون عدده الكمّيّ الرّئيس هو n = 4؟ اكتب الأعداد الكمية لكلّ حالة.

17. (I) اذكر الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية لـ: (أ) الكربون (Z = 6). (ب) الماغنيسيوم (Z = 12).

18. (I) اذكر الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية للنيتروجين (Z = 7).

19. (I)إذا كانت l = 4 لذرة هيدروجين معينة، فما القيم الممكنة لـ n و m_l، و m_s؟

20. (I) احسب قيمة الزخم الزاوي لإلكترون في الحالة n = 4، و l=3 للهيدروجين.

21. (II) إذا كانت m_l = - 3 لذرة هيدروجين، فما القيم الممكنة لـ n و l، و m_s؟

22. (II) أثبت إمكانية وجود 18 إلكترونا في القشرة الفرعية "g".

23. (II) ما التركيب الإلكتروني الكامل للعناصر التالية في الحالة الأرضية عندما تكون Z مساوية لـ: (أ) 27؟ (ب) 36؟ (جـ) 38؟[*مساعدة* : انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي].

24. (II) ما التركيب الإلكتروني الكلي لـ: (أ) سيلينيوم (Se)؟ (ب) الذهب(Au) ؟ (جـ) الراديوم (Ra)؟ [*مساعدة* : انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي].

25. (II) ذرات هيدروجين في الحالة $6s$. حدّد كلًّا من: (أ) العدد الكمي الرئيس. (ب) طاقة الحالة. (جـ) الزخم الزاوي الفلكي وعدده الكمّيّ. (د) القيم الممكنة للعدد الكمّيّ المغناطيسي. l.

26. (II) قدّر طاقة الترابط للإلكترون الثالث في الليثيوم باستخدام نظرية بور. [*مساعدة*: n = 2 لهذا الإلكترون و "يرى" شحنة صافية تعادل تقريبًا $+1e$]. القيمة المقيسة هي 5.36 eV.

27. (II) اثبت أنّ الزخم الزاوي الكلي للقشرة الفرعية المملوءة يساوي صفرا.

*28. (II) لكلّ من الانتقالات الذرية التالية، اذكر ما إذا كان الانتقال مسموحا أو ممنوعا، وإذا كان ممنوعا، فما القاعدة التي تمّت مخالفتها: (أ) $4p \rightarrow 3p$. (ب) $2p \rightarrow 1s$. (جـ) $3d \rightarrow 2d$. (د) $4d \rightarrow 3s$. (هـ) $4s \rightarrow 2p$.

*29. (II) ذرة هيدروجين مهيجة موجودة في الحالة 6d. (أ) اذكر الحالات جميعها (n, l) مع انبعاث فوتوني و"المسموح" للذرة أن تقفز إليها. (ب) كم عدد أطوال الأمواج المختلفة لتلك الحالات (بإهمال التركيب الدقيق)؟

*28 – 9 أشعة إكس

*30. (I) ما أقصر أطوال أمواج أشعة إكس المنبعثة بواسطة الإلكترونات المصطدمة بواجهة أنبوب صور تلفاز جهده 33.5 kV؟ وما أطوالها؟

*31. (I) أثبت أنّ أقصر طول موجي لبريمزشترالنج أشعة إكس المنبعثة من أنبوب أشعة إكس يساوي $\lambda = 0.030\ nm$، كم تبلغ الفولتية خلال الأنبوب؟

*32. (I) أثبت أنّ طول موجة الانقطاع λ_0 تعطى كالتالي:

$$\lambda_0 = \frac{1240\ nm}{V}$$

حيث V هي فولتية أنبوب أشعة إكس بالفولت.

*33. (II) استخدم النتيجة من (المثال 28 – 6) لتقدر طول موجة أشعة إكس المنبعثة عند قفز ذرة $(Z = 27)$ Co من $n = 2$ إلى $n = 1$.

*34. (II) قدّر الطول الموجي للانتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ للحديد $(Z = 26)$.

*35. (II) استخدم نظرية بور لتقدّر الطول الموجي لانتقال في الموليبدينيوم $(Z = 42)$ من $n = 3$ إلى $n = 1$. القيمة المقيسة هي 0.063 nm . لماذا لا نتوقع توافقا تاما؟

*36. قذِف خليطٌ من الحديد ومادة مجهولة بالإلكترونات. إذا كان الطول الموجي لخطوط K_α للحديد هو 194 pm وللمادة المجهولة 229 pm، فما المادة المجهولة؟

*28 – 11 الليزرات

*37. (II) الليزر المستخدم للحام قرنية مفصولة يرسل نبضات طولها 28 ms من ضوء 640 nm بقدرة مخرجة قدرها 0.68 W خلال النبضة. ما مقدار الطاقة الممكن ترسيبها لكلّ نبضة. وكم عدد الفوتونات المحتواة في كلّ نبضة؟ [*مساعدة* : انظر المثال 27 – 5].

*38. (II) ليزر منخفض القدرة، مستخدم في مختبر فيزياء، ومن الممكن أن يمتلك 0.50 mW، وقطر شعاع قدره 3.0 mm. احسب : (أ) متوسط شدة ضوء شعاع الليزر. (ب) قارن هذا بشدة مصباح ضوئي ينتج ضوء 40 W كما يشاهد من 2.0 m.

*39. (II) قدّر الانتشار الزاوي لشعاع ليزر والناتج من الحيود إذا خرج الشعاع من خلال مرآة قطرها 3.0 mm. افرض أن $\lambda = 694\ nm$. كم سيكون قطر هذا الشعاع إذا اصطدم بـ: (أ) قمر صناعي على ارتفاع 300 km فوق الأرض. (ب) القمر؟ [*مساعدة* : انظر البند 25 – 7].

*40. (II) ما الطول الموجي لليزر He – Ne؟

مسائل عامة

41. استخدم مبدأ عدم اليقين لتقدر عدم اليقين في موضع إلكترون في الحالة الأرضية لذرة هيدروجين. [*مساعدة*: حدّد الزخم باستخدام نموذج بور من (البند 27 – 12). وافرض أنّ الزخم يمكن أن يأخذ القيم الواقعة جميعها بين هذه القيمة والصفر]. كيف تقارن هذه النتيجة مع نصف قطر بور؟

42. إلكترون في الحالة $n = 2$ للهيدروجين يبقى هناك بالمتوسط حوالي 10^{-8} s قبل أن يقفز إلى الحالة $n = 1$. (أ) قدّر عدم اليقين في الطاقة للحالة $n = 2$. (ب) ما نسبة طاقة الانتقال هذه؟ (جـ) ما الطول الموجي، والعرض (بالنانومتر) لهذا الخط في طيف الهيدروجين؟

43. ما أكبر وأصغر قيمتين للزخم الزاوي L لإلكترون في القشرة $n = 5$؟

44. قدّر: (أ) العدد الكمّي L للزخم الزاوي الفلكي للأرض حول الشمس. (ب) عدد الاتجاهات الممكنة لسطح الفلك الأرضي.

45. تغادر رصاصة (12 g) بندقية بسرعة 180 m/s. (أ) ما الطول الموجي لهذه الرصاصة؟ (ب) إذا عُرِفَ موضع الرصاصة بدقة 0.60 cm (نصف قطر الأسطوانة)، فما أقل عدم يقين في زخمها؟

46. باستخدام صيغة بور لنصف قطر فلك إلكترون، قدّر متوسط المسافة من النواة لإلكترون في الفلك الداخلي العميق $(n = 1)$ لذرة يورانيوم $(Z = 92)$. تقريبا، ما مقدار الطاقة الضرورية لإزالة إلكترون الداخل العميق هذا؟

47. يعمل أنبوب أشعة إكس عند 95 kV مع تيار 25 mA وتتحول معظم طاقة الإلكترونات تقريبا إلى حرارة. إذا كانت الحرارة النوعية للوح كتلته 0.085 kg هي 0.11 kcal/kg.°C، فما ارتفاع درجة الحرارة لكلّ دقيقة إذا لم يستخدم ماء للتبريد؟

48. طاقة التأين (الترابط) للإلكترون الخارجي الأبعد في البورون هي 8.26 eV. (أ) استخدم نموذج بور لتقدّر "الشحنة الفاعلة"، Z_{eff} التي يراها هذا الإلكترون. (ب) قدّر متوسط نصف القطر الفلكي.

49. استخدم نظرية بور (خصوصا المعادلة 27 – 16) لتثبت أنّ مخطط موسيلي (الشكل 28 – 12) يمكن كتابته كالتالي:

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = a(Z - b)$$

حيث $b \approx 1$، وأوجد قيم a.

50. (أ) أثبت أنّ عدد الحالات المختلفة لقيمة معطاة لـ l تعادل $(2l + 1)$. (ب) ما هو الرقم لـ $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$؟

51. أثبت أنّ عدد حالات الإلكترون المختلفة الممكنة لقيمة معطاة لـ n هي $2n^2$. (انظر السؤال 50).

52. أطلق شعاعٌ من الإلكترونات بطاقة حركية 45 keV خلال شقّين رفيعين في حاجز. الشقان يبعدان 2.0×10^{-6} m عن بعضهما بعضًا. إذا وُضِعَت شاشة على بعد 35.0 cm خلف الحاجز. فاحسب البعد بين هدبين "منيرين" لنمط التداخل المنتج على الشاشة.

53. الزخم الزاوي في ذرة الهيدروجين يعطى بنموذج بور والميكانيكا الكمية. قارن النتائج لـ $n = 2$.

54. سيارة كتلتها 1100-kg تسير بسرعة (22 ± 0.22) m/s. ما أعلى دقة ممكنة لتحديد موضعها؟

55. يحتوي طيف ذري على خط طوله الموجي مركز عند 488 nm. وإن تمت أقيسة دقيقة، فستظهر أنّ الخط ينتشر فعليًّا بين 487 و 489 nm. قدّر عمر الحالة المهيجة التي انتجت هذا الخطّ.

56. سُرّعت بروتونات من السكون بواسطة فرق جهد V 550. ثمّ وُجّهت إلى شقين يفصل بينهما 0.70 mm. كم تبعد قمم التداخل عن بعضها على شاشة تبعد 28 m؟

57. إلكترون وبروتون، كلّ منهما ساكن في البداية، سُرّعا بتأثير الفولتية نفسها. افرض أنّ عدم اليقين في موقعهما قد أعطي بدلالة طول موجة دي برولي لكلّ منهما. أوجد نسبة عدم اليقين في زخمهما.

58. إذا كان العدد الكمّي الرئيس n محددًا بالمدى من 1 إلى 6 . فكم عدد العناصر التي يمكن أن نجدها في الطبيعة؟

59. إذا كان طول موجتك حسب دي برولي 0.50 m. فما سرعة حركتك إذا كانت كتلتك 75.0 kg؟ هل تلاحظ آثار الحيود عند مرورك من باب ما؟ وعلى نحو تقريبيّ، كم سيستغرقك المشي خلال الباب؟

60. افرض أنّ الطيف لعنصر مجهول يظهر سلسلة خطوط مع واحد من كلّ أربعة خطوط تتطابق مع خط من سلسلة لايمان للهيدروجين. على افتراض أنّ العنصر المجهول هو أيون ما ذو Z بروتونات وإلكترون واحد، حدّد Z والعنصر المعني.

*61. فوتونات أطوالها الموجية 0.154 nm انبعثت من سطح فلز معين عندما أطلقت عليه إشعاعات ذات طاقة مرتفعة. إذا كان طول موجة الفوتون هذا يرتبط بـ K_α، فما هو هذا العنصر؟

*62. أثبت أنّ انتشار الحيود لشعاع ليزري $\approx \lambda/D$ كما وُصِفَ في (البند 28 – 11)، هو تمامًا كما يمكن أن تتوقع من مبدأ عدم اليقين. [مساعدة: بما أنّ عرض الشعاع مقيد بأبعاد الشّقّ D، فإنّ مركبة زخم الضوء العمودية على محور الليزر غير محددة].

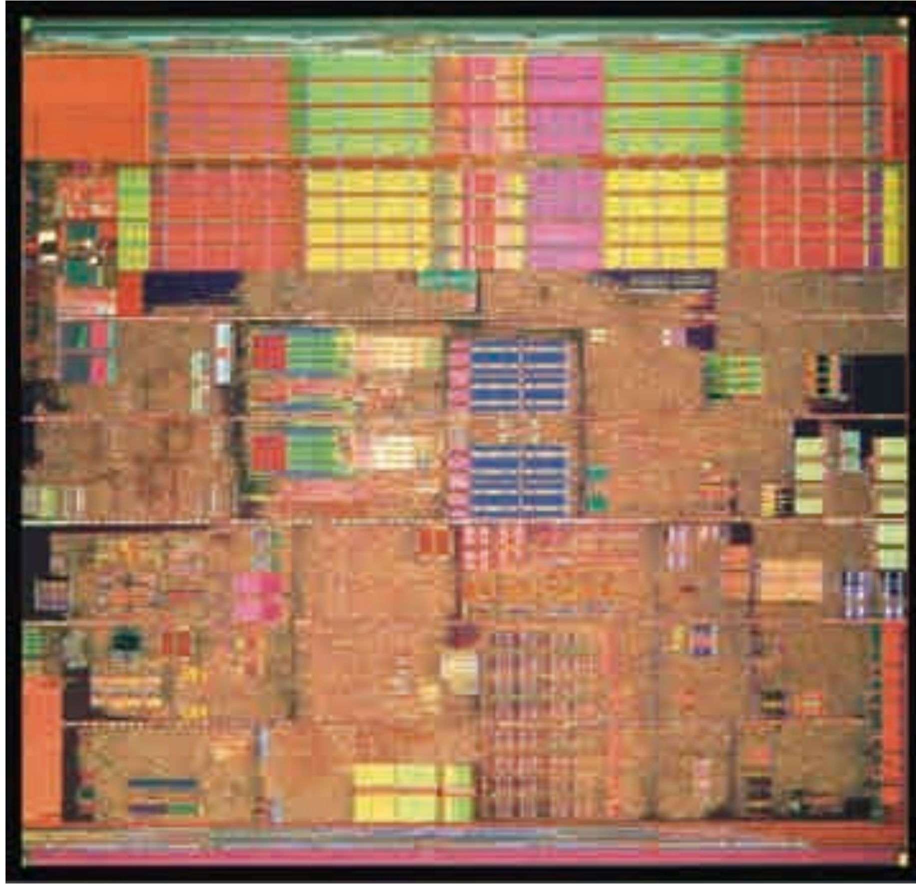
إجابات التمارين

أ : 2.1×10^{-24} kg·m/s, 2.3×10^{6} m/s.

ب : $2, 1, 0, -1, -2$

جـ : -0.38 eV, $\sqrt{20}\,\hbar$.

د : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$.



تُعدّ شريحة بنتيوم 4 إحدى المعالجات الرّئيسة المستخدمة في الحواسيب حاليًّا. حيث يحتوي نموذج 2004 على 125 مليون ترانزيستور، إضافة إلى الصّمّامات الثّنائيّة والعناصر الإلكترونيّة شبه الموصلة الأخرى الموجودة جميعها على شريحة واحدة طول جانبها 1 سم تقريبًا. وقبل مناقشة أشباه الموصلات وتطبيقاتها، سندرس طريقة وصف النّظريّة الكمّيّة لترابط الذّرات لتشكيل الجزيئات، وكيفية تفسيرها للتّصرّفات الجزيئيّة. ثم نفحص الطّريقة التي تشكّل فيها الذّراتُ والجزيئات المواد الصّلبة، مع التّركيز على الفلزّات وأشباه الموصلات، واستخداماتها في الأجهزة الإلكترونيّة.

الفصل 29

الجزيئات والمواد الصّلبة

كان للميكانيكا الكمية أثرٌ عميقٌ في حياتنا من الناحيتين العقلية والتقنية منذ أن طوّرت في عشرينيّات القرن العشرين (1920s). وكما رأينا في الفصل الثامن والعشرين، فإنّ الطريقة التي كنا نرى العالم فيها قد تغيرت أيضا. والآن، سنناقش كيف منحتنا الميكانيكا الكمية فهمًا لطريقة تركيب الجزيئات والمادة في مجملها، بالإضافة إلى عدد من التطبيقات المهمة، والتي من ضمنها أجهزة أشباه الموصلات، وتطبيقات علوم حياتية.

* 1-29 التّرابط في الجزيئات

تمثلت إحدى نجاحات الميكانيكا الكمية العظيمة في قدرتها على منح العلماء- أخيرًا- فهمًا أفضل لطبيعة الروابط الكيميائية. وبسبب اعتمادها على الفيزياء، وضرورة استيعابها لأهميتها الكبيرة في مجالات عديدة، سنقوم بمناقشتها في هذا الفصل.

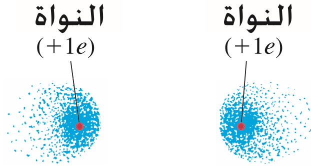
نقصد بالجزيء، مجموعة مترابطة بقوة من ذرتين أو أكثر لدرجة تجعلها تتصرف كوحدة واحدة. وعندما تلتصق الذرات ببعضها على هذه الصورة، نقول إنّ هناك **رابطة** كيميائية قد تشكّلت. وهناك نوعان رئيسان من الروابط الكيميائية القوية هما: التساهمية والأيونية. وكثير من الروابط في الحقيقة تقع بين هذين النوعين الرّئيسين.

الرّوابط التّساهميّة

رابطة تساهمية

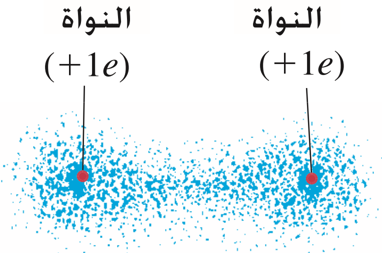
إذا أردنا معرفة كيفية تشكّل **الروابط التساهمية**؛ فإنّنا سنأخذ أبسط حالة، وهي الرابطة التي تمسك ذرتي هيدروجين مع بعضهما بعضًا لتشكّل جزيء الهيدروجين H_2. تُعدّ طريقة أو آلية عمل هذه الرابطة بصورة رئيسة هي ذاتها للروابط التساهمية الأخرى. فعندما تقترب ذرتا هيدروجين من بعضهما بعضًا، تبدأ سحابتاهما الإلكترونيتان بالتداخل، لتستطيع عندها الإلكترونات من كلّ ذرة "بالدوران" حول النواتين. (وهذا ما يدعى أحيانا "مشاركة" الإلكترونات) . إذا كان كلّ من الإلكترونين في الحالة الأرضية $(n = 1)$ حسب ذرته، فهناك احتمالان هما أن يكون غزلهما (الفصل 28) متوازيين (كلاهما إلى الأعلى أو إلى الأسفل). وفي كلتا الحالتين، فإنّ الغزل الكلي $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ ، أو أنّ غزلهما يمكن أن يكون متعاكسا $(m_s = +\frac{1}{2}$ لأحدهما، و $m_s = -\frac{1}{2}$ للآخر)، فيكون الغزل الكلي $S = 0$. وسنرى الآن أنّ الرابطة قد تكونت للحالة $S = 0$ فقط، عندما يكون الغزل متعاكسًا.

أولاً، سنأخذ بالحسبان الحالة $S = 1$، عندما يكون الغزل متشابها. لا يمكن للإلكترونين أن يكونا عند أخفض حالة طاقة وملتصقين بالذرة ذاتها؛ لأنهما سيمتلكان عندئذ أعداداً كمية متماثلة مخالفين بذلك مبدأ الاستبعاد، الذي يخبرنا بأنه لا يمكن لإلكترونين أن يشغلا الحالة الكمية نفسها. وإذا حصل إلكترونان على الأعداد الكمية نفسها ، فيجب أن يكونا مختلفين بطريقة ما – وتحديدا، أن يكونا في مكانين مختلفين في الفضاء (فعلى سبيل المثال، أن يكونا ملتصقين بذرتين مختلفتين). وعندما تقترب الذرتان من بعضهما بعضا، فستبقى إلكتروناتهما بعيدة عن بعضها كما هو مبين في التوزيع الاحتمالي الظاهر في (الشكل 29 – 1). وعندما ستُطرد النواتان المشحونتان بشحنتين موجبتين بعضهما بعضا، ولن تتشكّل عندئذٍ أيّ رابطة.



الشكل 29 – 1 توزيع إلكتروني احتمالي (سحابة إلكترونية) لذرتي H عندما يكون غزلهما متشابها $(S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1)$.

وعند الحالة $S = 0$ -على الوجه الآخر- يكون الغزل متعاكسا، ويكون الإلكترونان في حالتين كميتين مختلفتين بسبب ذلك (m_s مختلفة، $+\frac{1}{2}$ لواحدة و $-\frac{1}{2}$ للأخرى). ولذلك، ستستطيعان الاقتراب من بعضهما. وفي هذه الحالة، سيبدو التوزيع الاحتمالي كما في (الشكل 29 – 2)؛ تستطيع الإلكترونات أن تقضي معظم وقتها بين النواتين. والنواتان المشحونتان بشحنتين موجبتين ستنجذبان إلى السحابة الإلكترونية المشحونة بشحنة سالبة الموجودة بينهما. وهذا هو التجاذب الذي يمسك الذرتين مع بعضهما لتشكيل الجزيء؛ وهذه هي *الرّابطة التّساهميّة* .



الشكل 29 – 2 توزيع إلكتروني احتمالي (سحابة) حول ذرتي H عندما يكون غزلهما متعاكسا $(S = 0)$. وفي هذه الحالة، تتشكل رابطة بسبب تجاذب النواتين الموجبتين إلى تركيز الشحنات السالبة بينهما. وهذا جزيء هيدروجين H_2.

التوزيعان الاحتماليان (للشكلين 29 – 1، و 29 – 2) من الممكن أن يفهما بشكل أفضل على أساس موجي. وما يتطلبه مبدأ الاستبعاد أنّه عندما يتشابه الغزل، سيكون هناك تداخل هدّام بين دوال الإلكترونات الموجية في المنطقة بين الذرتين. ولكن عندما يتعاكس الغزل، يحدث تداخل بناء في المنطقة بين الذرتين، تنتج منه كمية كبيرة من الشحنة السالبة هناك. ويمكن القول حينئذٍ بأنّ رابطة تساهمية قد تكونت نتيجة للتداخل البناء بين دوال الإلكترونات الموجية في الفضاء بين الذرتين، وكذلك للتجاذب الكهروستاتيكي بين النواتين الموجبتين، وتركيز الشحنات السالبة بينهما.

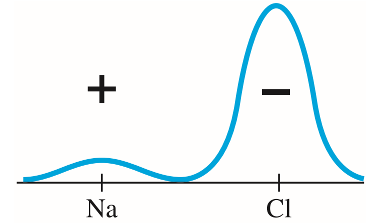
تفسير الطاقة للرابطة

ويمكن فهم أسباب تشكل الرابطة من وجهة نظر الطاقة؛ فعندما تقترب ذرتا H من بعضهما، مع كون غزل إلكتروناتهما متعاكسا، فإنّ الإلكترونات ستشغل الحيز نفسه في الفضاء، كما نوقش سابقًا. وهذا يعني أنّ كلّ إلكترون يستطيع الآن التحرّك بحرية في فضاء الذرتين بدلا من داخل حيّز إحداهما فقط. ولأنّ كلّ إلكترون يشغل الآن فضاءً أكبر، فهو مرتبط بالموضع بدرجة أقل بكثير. وبسبب أنّ كلّ إلكترون له "فلك" أكبر، فإنّ طول موجته λ يستطيع أن يكون أكبر أيضا. لذا، فإنّ زخمه $p = h/\lambda$ (الشكل 27 – 8) يمكن أن يكون أقلّ. ومع هذا الزّخم الأقلّ، تصبح طاقة كلّ إلكترون أقلّ عند اتحاد الذرتين مقارنة بطاقته عندما يكونان منفصلَيْن؛ أي أنّ للجزيء طاقة أقلّ من تلك التي للذرتين المنفصلتين. وعليه، فهو مستقر أكثر. ومن الضروري إضافة طاقة بمقدار معين لكلّ جزيء H_2 لينفصل إلى ذرتين من H منفصلتين. ولهذا، فإنّ جزيء H_2 يشكّل كيانًا مستقرًا. وهذا ما نعنيه برابطة. وتُدعى الطاقة الضرورية لكسر رابطة **"طاقة الرّابطة"**، أو **"طاقة الرّبط"**، أو **"طاقة التّفكّك"**. وطاقة ربط جزيء الهيدروجين، H_2، تساوي 4.5 eV.

طاقة الرابطة

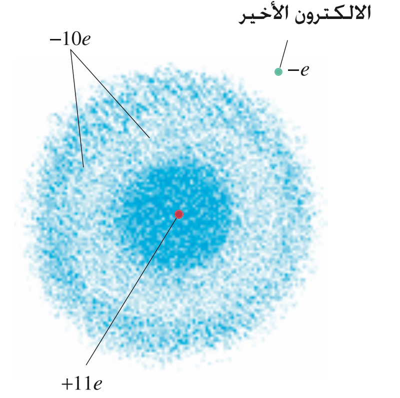
الروابط الأيونية

تعدّ الرابطة الأيونية -إلى حدّ ما- حالة خاصة من الرابطة التساهمية. وبدلًا من المشاركة المتساوية بالإلكترونات، تصبح المشاركة غير متساوية. وعلى سبيل المثال، في كلوريد الصوديوم (NaCl)، يقضي الإلكترون الخارجي للصوديوم معظم وقته تقريبًا حول الكلور (الشّكل 29 – 3) . وتكتسب ذرة الكلور شحنة سالبة صافية كنتيجة للإلكترون الإضافي، في حين تترك ذرة الصوديوم مع شحنة موجبة صافية. أمّا التجاذب الكهروستاتيكي بين هاتين الذرتين المشحونتين فيبقيهما معًا. وتسمى الرّابطة الناتجة بالرّابطة الأيونية لأنها تشكّلت بواسطة التجاذب بين الأيونين (Na^+ و Cl^-). ولكي نفهم الرابطة الأيونية؛ يجب أن نفهم سبب قضاء إلكترون الصوديوم الإضافي الكثير من وقته حول ذرة الكلور. فعلى الرّغم من كلّ هذا، فإنّ ذرة الكلور متعادلة. فلماذا إذن ستجذب إلكترونًا آخر؟

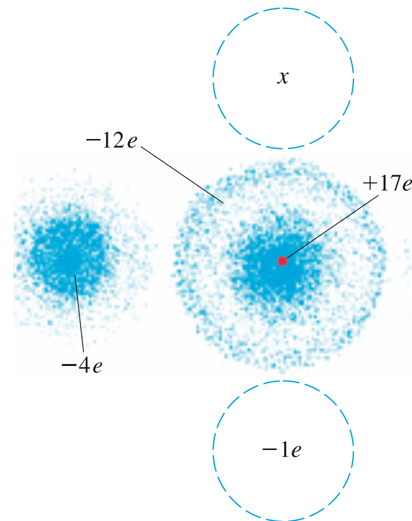


الشكل 29 – 3 توزيع احتمالي للإلكترون الأخير للصوديوم في NaCl.

وتقع الحل في التوزيعات الاحتمالية للذرتين المتعادلتين. يحتوي الصوديوم على 11 إلكترونًا؛ 10 منها في قشور مغلقة كروية متماثلة (الشّكل 29 – 4). في حين يقضي الإلكترون الأخير معظم وقته خارج هذه القشور المغلقة. ولأنّ القشور المغلقة لها شحنة صافية مقدارها $-10e$ وشحنة النواة $+11e$، فإنّ الإلكترون الخارجي الأبعد في الصوديوم "يشعر" بتجاذب صافٍ ناجٍ من $+1e$. وهو غير مربوطٍ بقوة كبيرة. وعلى الجانب الآخر، فإنّ 12 من إلكترونات الكلور الـ 17 تشكل قشورًا مغلقة، أو قشورًا فرعية (تتوافق مع $1s^22s^22p^63s^2$). وهذه الإلكترونات الـ 12 تشكل درعًا كرويًا حول النواة. أما الإلكترونات الخمسة الأخرى فهي في حالات $3p$ حيث توزيعاتها الاحتمالية ليست متماثلة كرويًا، ولها شكل مشابه لحالات $2p$ في الهيدروجين المبينة في (الشكلين 28 – 9 ب و جـ). إنّ 4 من إلكترونات $3p$ هذه يمكن أن تمتلك توزيعًا على هيئة حلقة، "مبرومة الشكل" متماثلًا حول محور z، كما هو مبين في (الشّكل 29 – 5). أمّا الإلكترون الخامس، فيمكن أن يمتلك توزيعًا "عموديّ الشكل" كما في (الشّكل 28 – 9 ب) عندما $m_l = 0$، والذي يبين في (الشّكل 29 – 5) في خطوط متقطعة فقط لأنّه نصف مملوء. أي أنّ مبدأ الاستبعاد يسمح بوجود إلكترون واحد إضافي في هذه الحالة (وسيمتلك غزلًا معاكسًا للإلكترون الموجود هناك سابقًا). وإذا حصل أنّ إلكترونًا إضافيًا –ولنقل من ذرة Na كان في الجوار، فيمكن له أن يكون في هذه الحالة، ولنقل عند نقطة x في (الشّكل 29 – 5). ويمكن أن يشعر بتجاذب ناجٍ من ما يعادل $+5e$؛ لأنّ شحنة النواة $+17e$ قد حجبت جزئيًا عند هذه النقطة بواسطة 12 إلكترونًا داخليًا فقط. وعليه، فإنّ الإلكترون الخارجي لذرة الصوديوم سيجذب بقوة أكبر بواسطة $+5e$ من ذرة الكلور مقارنة مع $+1e$ من قِبَلِ ذرته نفسها. إنّ هذا، بالإضافة إلى الجذب القوي بين الأيونين عند بقاء الإلكترون الإضافي تحت سيطرة Cl^-، ينتج توزيع الشحنات في (الشّكل 29 – 3). وبالتالي تتكون الرابطة الأيونية.



الشكل 29 – 5 في ذرة صوديوم متعادلة، تحجب الإلكترونات العشرة الداخلية النواة، فينجذب الإلكترون الخارجي الوحيد بواسطة شحنة صافية مقدارها $+1e$.

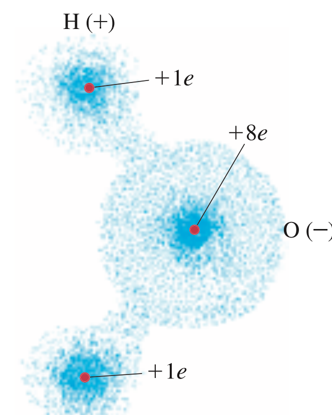


(الشكل 29 - 5) ذرة كلور متعادلة. $+17e$ في النواة، تحجب بواسطة 12 إلكترونًا في القشور الداخلية والقشور الفرعية. أربعة من إلكترونات $3p$ الخمسة مبينة في سحب على هيئة حلقة (دونات)، والخامس في سحابة (خطّ مقطع) مركزة حول محور z (رأسيًا). أما الإلكترون الإضافي عن x فسينجذب بواسطة شحنة صافية يمكن أن تصل إلى $+5e$.

الخاصيّة الأيونيّة الجزئيّة للرّوابط التّساهميّة

تحدث الروابط التساهمية النقية التي يتم تقاسم الإلكترونات خلالها بالتساوي في الجزيئات المتماثلة مثل H_2 و O_2 و Cl_2. وعندما تكون الذرات المعنية مختلفة عن بعضها ، فمن الطبيعي أن تجد الإلكترونات المشتركة تميل إلى إحدى الذرتين أكثر منها إلى الأخرى. والحالة المتطرفة هي الرابطة الأيونية. أمّا في الحالات المتوسطة، فيقال إنّ الرابطة التساهمية لها خاصية أيونية جزئية. والجزيئات نفسها **قطبية**؛ أي أنّ جزءًا واحدًا (أو أجزاء) من الجزيء له شحنة صافية موجبة، أمّا الأجزاء الأخرى، فلها شحنة صافية سالبة. ومثال على ذلك، جزيء الماء H_2O (الشّكل 29 – 6). ومن المتوقع إيجاد الإلكترونات المشتركة بدرجة أكبر حول ذرة الأكسجين وليس حول ذرتي الهيدروجين.

الجزيئات القطبية



الشكل 29 – 6 جزيء الماء H_2O قطبي.

السبب مشابه لذلك الذي نوقش سابقًا والمتعلق بالروابط الأيونية. للأكسجين ثمانية إلكترونات ($1s^22s^22p^4$) (أربعة منها تشكل لبًّا كرويًّا متماثلًا، وأمّا الأربعة الأخرى فيمكن أن تمتلك، على سبيل المثال، توزيعا مبروم الشّكل). إنّ التوزيع العمودي الشّكل على محور z مثل ذلك المبين مقطعا في (الشكل 29 – 5) يمكن أن يكون خاليا. وبذلك، فإنّ إلكترونات ذرة الهيدروجين يمكن أن تنجذب بواسطة شحنة صافية مقدارها $+4e$. وهي في الوقت نفسه أيضًا منجذبة بواسطة نواتي H، وهي بذلك تدور جزئيًّا حول ذرتي H كما تدور حول ذرة O. والتأثير الصافي هو أنّ هناك شحنة موجبة صافية على كلّ ذرة H (أقلّ من $+1e$)، بسبب قضاء الإلكترونين جزءًا من وقتهما فقط هناك. وهناك شحنة سالبة صافية على ذرة O.

* 2-29 رسومات توضيحيّة لطاقة – وضع الجزيئات

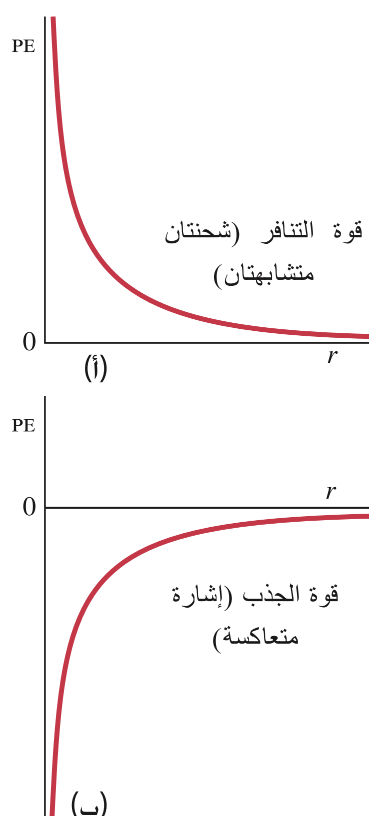
من المفيد أن تحلل التفاعل بين جسمين – ولنقل بين ذرتين أو جزيئين – مستعينا برسم توضيحي، مخطط طاقة وضع مقابل المسافة الفاصلة.

وللحالة البسيطة للشحنتين النقطيتين q_1 و q_2، تعطى PE بواسطة (نجمع المعادلتين 17 – 2 و 17 – 5 مجموعتين)

$$\text{PE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r}$$

وتمثل r المسافة الفاصلة بين الشحنتين، والثابت $(1/4\pi\epsilon_0)$ يساوي $9.0 \times 10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$. وإذا كان للشحنتين الإشارة نفسها، فإنّ PE موجبة لقيم r جميعها. ويصبح الرّسم البياني لـ PE مقابل r في هذه الحالة كما هو مبين في (الشكل 29 – 7أ). وتكون القوة طاردة. (للشحنات الإشارة نفسها) فيزداد ارتفاع المنحنى كلما قلت r، ويعدّ هذا منطقيًّا؛ لأنّ الشغل قد بذل لجلب الشحنتين إلى بعضهما. ونتيجة لذلك، تزداد طاقة وضعهما. إلى جانب أنه إذا كانت الشحنتان *متعاكستين* في الإشارة، فإنّ PE تصبح سالبة لأنّ الناتج $q_1 q_2$ سالب. وتصبح القوة جاذبة في هذه الحالة. ويظهر الرسم البياني لـ PE مقابل r كما هو مبين في (الشكل 29 – 7ب)، لتصبح PE *سالبة* أكثر كلّما قلت r.

الشكل 29 – 7 طاقة الوضع كدالة في البعد لشحنتين نقطيتين لـ (أ) إشارات متشابهة. (ب) إشارات متعاكسة.

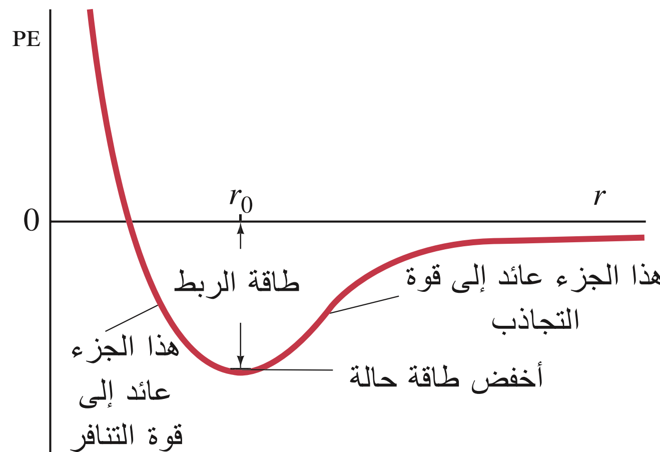


والآن، سننظر إلى الرسم التوضيحي لطاقة الوضع لتشكيل رابطة تساهمية، كتلك التي لجزيء الهيدروجين، H_2. تم تخطيط طاقة الوضع لذرة H واحدة بوجود الأخرى في (الشكل 29 – 8). وابتداءً من r كبيرة، تقل PE كلما اقتربت الذرتان من بعضهما؛ بسبب تركيز الإلكترونات بين النواتين (الشكل 29 – 2)، فيحدث عندئذٍ تجاذب. ومع هذا، فعند مسافات قصيرة جدًا، "تحشر" الإلكترونات إلى الخارج – لعدم وجود متسع لها بين النواتين. ودون الإلكترونات بين النواتين، ستشعر كلّ منهما بقوة تنافر بسبب الأخرى. لذا، فإنّ المنحنى سيرتفع مع نقصان قيمة r أكثر.

وهناك مسافة فاصلة مثلى بين الذرتين، r_0 في (الشكل 29 – 8)، تصل قيمة الطاقة عندها إلى أدنى قيمة ممكنة.

وهذه نقطة أعلى اتزان لجزيء الهيدروجين، وتمثل r_0 متوسط المسافة الفاصلة بين الذرتين في جزيء H_2. وتمثل أخفض نقطة في هذه "البئر" طاقة الربط،* كما هو مبين. وهذا مقدار الطاقة الضروري إضافته إلى النظام لفصل الذرتين إلى مالا نهاية، حيث $PE = 0$. ولجزيء H_2، فإنّ طاقة الربط هي 4.5 eV، و $r_0 = 0.074$ nm تقريبا.

طاقة ربط



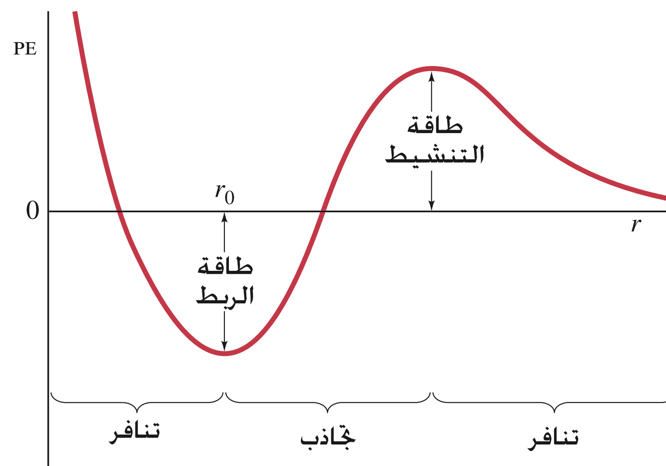
الشكل 29 – 8 رسم توضيحي لطاقة وضع جزيء H_2. تمثل r المسافة الفاصلة بين ذرتي H. طاقة الربط (فرق الطاقة بين $PE = 0$ وأخفض طاقة حالة قرب قعر البئر) هي 4.5 eV، و $r_0 = 0.074$ nm.

ولروابط عديدة، فإنّ منحنى طاقة الوضع له الهيئة المبينة في (الشّكل 29 – 9). ولا تزال هناك مسافة مثلى r_0 يكون الجزيء عندها مستقرا. ولكن عندما تقترب الذرات من مسافات بعيدة، فإنّ القوة الابتدائية تكون قوة تنافر بدلًا من قوة تجاذب. ولذلك، فإنّ الذرات لا تتفاعل تلقائيًا. وبدلًا من هذا، يجب حقن النظام ببعض الطاقة الإضافية لدفعه فوق " السنام" (أو الحاجز) في الرسم التوضيحي لطاقة الوضع. وهذه الطاقة الضرورية تدعى **طاقة التنشيط** (*Activation Energy*).

طاقة تنشيط

إنّ المنحنى في (الشكل 29 – 9) أكثر عمومية بكثير من ذلك الذي في (الشكل 29 – 8). وطاقة التنشيط تعكس غالبًا الحاجة لكسر روابط أخرى، قبل أن تصنع الرابطة قيد المناقشة. وعلى سبيل المثال، لتكوين الماء من جزيئي O_2 و H_2؛ يجب أولًا كسر جزيئي H_2 و O_2 إلى ذراتهما H و O بإضافة طاقة، وهذا ما تمثله طاقة التنشيط.

* لا تتطابق طاقة الربط تمامًا مع أسفل منحنى PE، ولكن مع أخفض طاقة حالة، وهي أعلى بقليل من تلك، كما هو مبين في (الشكل 29 – 8).

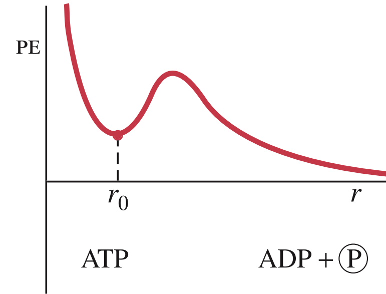


الشكل 29 – 9 رسم توضيحي لطاقة الوضع لرابطة تتطلب طاقة التنشيط.

وعندها يمكن لذرات H . و O أنّ تتحد لتشكّل H_2O مع إطلاق قدر هائل من الطاقة أكثر من الذي أضيف في البداية. ويمكن تزويد طاقة التنشيط الابتدائية بفعل شرارة كهربائية على مزيج من H_2 و O_2 لتكسير عدد قليل من هذه الجزيئات إلى ذرات H و O. كما أنّ إطلاق الطاقة المتفجرة الناجّة عند إدماج هذه الذرات لتشكّل H_2O يزود وبسرعة طاقة التنشيط الضرورية للتفاعلات اللاحقة. لذلك تتكسر جزيئات إضافية من H_2 و O_2 وتندمج مرة أخرى ليتشكّل H_2O .

ويمكن للرسوم التوضيحية لطاقة الوضع للروابط الأيونية أن تحظى بأشكال متشابهة. فعلى سبيل المثال، في NaCl، تجذب أيونات Na^+ و Cl^- بعضها بعضًا من مسافات أكبر بقليل من r_0، ومع هذا، فإنّ تداخل قشور الإلكترونات الداخلية عند المسافات الأقصر ينمي التنافر. لذا، فإنّ الذرتين تكونان أكثر استقرارًا عند مسافة فاصلة متوسطة ما، r_0. وغالبًا فإنّ هناك طاقة تنشيط ما.

وفي بعض الأحيان، تبدو طاقة الوضع لرابطة ما كتلك المبينة في (الشكل 29 – 10). وفي هذه الحالة، فإنّ طاقة الجزيء المترابط، عند مسافة فاصلة r_0، هي أكبر منها عند غياب الرابطة ($r = \infty$). أي أنّ هناك حاجة إلى طاقة مُدخلة لتتشكّل الرّابطة (ولذلك فإنّ طاقة الربط سالبة). وهناك طاقة تتحرر عندما تكسر الرابطة. إنّ رابطة كتلك تكون مستقرة فقط بسبب وجود حاجز طاقة التنشيط. وهذا النوع من الروابط مهم في الخلايا الحية، حيث يمكن تخزين طاقة بكفاءة في هذه الروابط في جزيئات معينة، وخصوصا في ATP (أدينوساين ثلاثي الفوسفات). الرابطة التي تربط آخر مجموعة فوسفات رُمِزَ إليها Ⓟ في (الشكل 29 – 10) مع بقية الجزيء (ADP، ويعني أدينوساين ثنائي الفوسفات، لأنها تحتوي على وحدتين من الفوسفات فقط) لها PE على الهيئة المبينة في (الشكل 20 – 10)؛ الطاقة مختزنة في هذه الرابطة. وعند انكسار الرابطة ($ATP \rightarrow ADP + $ Ⓟ)، تطلق طاقة يمكن استعمالها من أجل "إحداث" تفاعلات كيميائية أخرى .

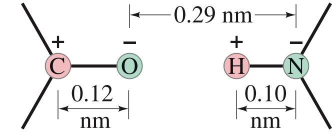


الشكل 29 – 10 رسم توضيحي لطاقة وضع لتشكيل ATP من ADP وفوسفات (Ⓟ).

وفي الخلايا الحية، تمتلك كثيرٌ من التفاعلات الكيميائية طاقات تنشيطية غالباً ما تكون بمقدار عدة eV. وحواجز طاقة كهذه، ليس من السهل التغلب عليها داخل الخلية. وهنا يأتي دور الأنزيمات التي تعمل كمحفزات (*Catalysts*)، وهذا يعني أنّها تعمل على تخفيض طاقة التنشيط لتجعل التفاعلات تحدث. ودون هذه المحفزات، لم يكن بالإمكان حدوث ذلك؛ لأنّ الأنزيمات تعمل على تشويه سحب الترابط الإلكترونية، فيُصبح تكسير الروابط الابتدائية أمرا سهلا.

* 3-29 الروابط (فان دير فالز) الضعيفة

ما إن تتشكل الرابطة بين ذرتين أو أيونين، يصبح من الطبيعي أن تضاف الطاقة لكسر هذه الرابطة وفصل الذرات. وكما ذكر في (البند 29 – 1)، تُدعى هذه الطاقة طاقة الرابطة أو طاقة الربط. إنّ طاقة الربط للرابطتين التساهمية والأيونية تتراوح من 2 eV إلى 5 eV. وتدعى الرابطتان اللتان تمسكان الذرات مع بعضها بعضاً لتشكل جزيئات، غالباً **روابط قوية** لتمييزها عمّا يُسمّى "روابط ضعيفة". يعدّ هذا المصطلح **رابطة ضعيفة**، كما استخدمناه هنا، وهو يُشير إلى الالتصاق بين الجزيئات بسبب التجاذب الكهروسكوني البسيط – كالذي بين الجزيئات القطبية (وليس الجزيء القطبي ذاته، وهي رابطة قوية). إنّ قوةَ الالتصاق أقلُّ بكثير من الروابط القوية. كما أنّ طاقات الربط في المدى المحصور بين 0.04 eV و 0.3 eV ولهذا، فإنّها تُدعى "روابط ضعيفة".



الشكل 29 – 11 التناقطبية $C^+—O^-$ و $H^+—N^-$ تجذب بعضها بعضا. (هذه التناقطبية يمكن أن تكون جزءا من جزيئات سيتوساين وجوانِاين على سبيل المثال، (الشكل 19 - 12). الشحنتان + و - نمطيًا تمتلكان قيمًا هي أجزاء من e.

تنشأ الروابط الضعيفة بشكل عام من التجاذب بين التناقطبيات. (شحنتان نقطيتان متساويتان Q، مختلفتا الإشارة، تفصل بينهما مسافة l، وتسميان **تناقطبي كهربائي**، كما رأينا في الفصل 17). وعلى سبيل المثال، يبين (الشكل 29 – 11) جزيئين، لهما عزما تناقطبي دائمين، يجذب أحدهما الآخر. وبجانب **روابط "التناقطبي – تناقطبي"** هذه، يمكن أن يكون هناك أيضا **روابط تناقطبي – تناقطبي** محفزة، والتي يمكن من خلالها لجزيء قطبي ذي عزم تناقطبي دائم أن يحفز عزم تناقطبي في جزيئات أخرى متعادلة كهربائيًا، تماما مثلما تستطيع شحنة وحيدة من تحفيز فصل الشحنات في جسم قريب (انظر الشكل 16 – 7). ويمكن أن يكون هناك أيضًا تجاذب بين جزيئين غير قطبيين، بسبب تحرك إلكتروناتهما في فضائهما؛ وعند أيّ لحظة ربّما تكون هناك مرحلة فصل شحنات عابرة، تولد تجاذبًا ضعيفًا. وتُدعى هذه الروابط الضعيفة جميعها **روابط فان دير فالز**، وتُدعى هذه القوى **قوى فان دير فالز**. وتظهر طاقة الوضع المعنية في (الشكل 29-8)، وتتغير تبعًا للعلاقة $1/r^6$.

وعندما تكون إحدى الذرات في **رابطة تناقطبي – تناقطبي** هي الهيدروجين، كما في (الشكل 29 – 11)، فعندها تدعى **رابطة هيدروجينية**. وهي بشكل عام (الرابطة الهيدروجينية) أقوى الروابط الضعيفة؛ لأنّ الهيدروجين أصغر الذرات التي يمكن الاقتراب منها. وللروابط الهيدروجينية أيضًا ميزة "تساهمية" جزئية، وهي أنّ الإلكترونين بين التناقطبيين يمكن التشارك فيهما خلال مدى قصير، لتتشكل رابطة قوية تدوم فترة أطول.

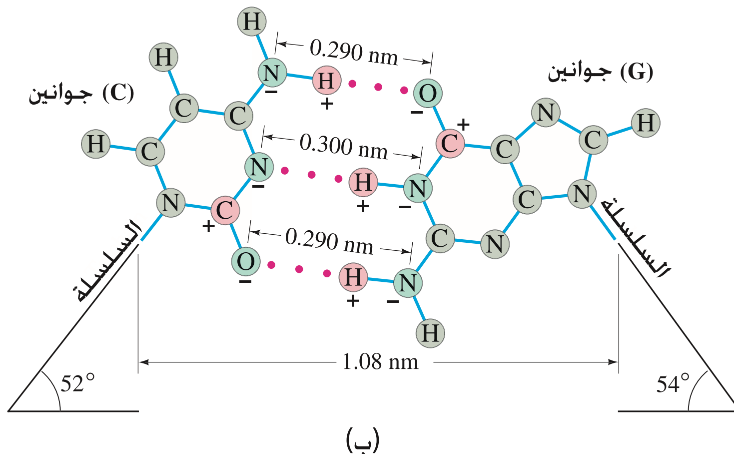
تطبيق الفيزياء

DNA

إنّ الروابط الضعيفة مهمة في السوائل والمواد الصلبة خاصة عند اختفاء الروابط القوية (انظر البند 29 – 5). وهي أيضًا مهمّة جدًّا لفهم أنشطة الخلايا، مثل شكل اللولبي المزدوج DNA (الشكل 29 – 12)، واستنساخ DNA (انظر البند 16 – 11). إنّ متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في خلية حية عند درجات الحرارة الطبيعية ($T \approx 300\,K$) حوالي $\frac{3}{2}kT \approx 0.04\,eV$ و هي تقع ضمن قيم الروابط الضعيفة. وهذا يعني أنّ رابطة ضعيفة ما جاهزة لتتكسر عن طريق التصادمات الجزيئية فقط. لذا، فإنّ الروابط الضعيفة ليست دائمة تمامًا ؛ بل إنّها تلتصق لفترات قصيرة، وهذا يساعدها على القيام بأدوار معينة في الخلية.



(أ)



(ب)

الشكل 29 – 12 (أ) جزء من اللولبي المزدوج DNA. تمثل النقاط الحمراء روابط هيدروجينية بين الحبلين. (ب) منظر "قريب": سايتوساين. (جـ) جوانِاين. (د) جزيئات على حبلين مختلفين من اللولبي المزدوج DNA ضمت لبعضها بعضا بواسطة روابط هيدروجينية (نقاط حمراء) مرتبطة بـ H^+ على جزيء واحد منجذب إلى N^- أو $C^+—O^-$ من جزيء على السلسلة المجاورة. انظر أيضا إلى (البند 16 - 11 والشكلين 16 - 14، و 16 - 45).

وعلى الجانب الآخر، فإنّ الروابط القوية – تلك التي تشد الجزيئات إلى بعضها– غالباً لا تكسر أبداً ببساطة بتأثير التصادمات الجزيئية. لذا، فهي دائمة نسبيّا. ويمكن لها أن تتكسر بعمل كيميائي (وحتى عمل روابط أقوى) وهذا عادة ما يحدث في الخلية بمساعدة أنزيم ما، والذي هو جزيء بروتين.

المثال 1-29 **طاقة النويد**

احسب طاقة الوضع بين الثناقطبي $C=O$ لثيامين، والثناقطبي $N-H$ لأداناين، مفترضًا أنّ الثناقطبين قد اصطفا كما هو مبين في (الشكل 29 – 11). حسابات عزم الثناقطبي (انظر الجدول 17 – 2) تعطي

$$q_H = -q_N = 0.19e = 3.0 \times 10^{-20}\,\mathrm{C}$$

و

$$q_C = -q_O = 0.41e = 6.6 \times 10^{-20}\,\mathrm{C}$$

النهج : نريد إيجاد طاقة الوضع للشحنتين في ثناقطبي واحد والناجمة من الشحنتين في الآخر. وسيكون هذا مساويًا للشغل الضروري لفصلهما بعيدا عن بعضهما إلى مالا نهاية. طاقة الوضع PE لشحنة ما q_1 في وجود شحنة q_2 هي

$$PE = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

حيث $k = 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N \cdot m^2/C^2}$ (انظر المعادلتين 17 – 2، و 17 – 5).

الحلّ: ستتكون طاقة الوضع (باستخدام الرمز U) من أربعة حدود هي :

$$U = U_{CH} + U_{CN} + U_{OH} + U_{ON}$$

حيث U_{CH} تعني طاقة الوضع لـ C في وجود H، وهكذا للحدود الأخرى. ليس لدينا حدود تعود إلى C و O ، أو N و H، على افتراض أنّ الثناقطبيين كميتان مستقرتان. وعندئذٍ

$$U = k\frac{q_C q_H}{r_{CH}} + k\frac{q_C q_N}{r_{CN}} + k\frac{q_O q_H}{r_{OH}} + k\frac{q_O q_N}{r_{ON}}$$

وباستخدام المسافات المبينة في (الشكل 29 – 11)، نحصل على

$$U = (9.0 \times 10^9\,\mathrm{N \cdot m^2/C^2})\left(\frac{(6.6)(3.0)}{0.31} + \frac{(6.6)(-3.0)}{0.41} + \frac{(-6.6)(3.0)}{0.19} + \frac{(-6.6)(-3.0)}{0.29}\right)\frac{(10^{-20}\,\mathrm{C})^2}{(10^{-9}\,\mathrm{m})}$$

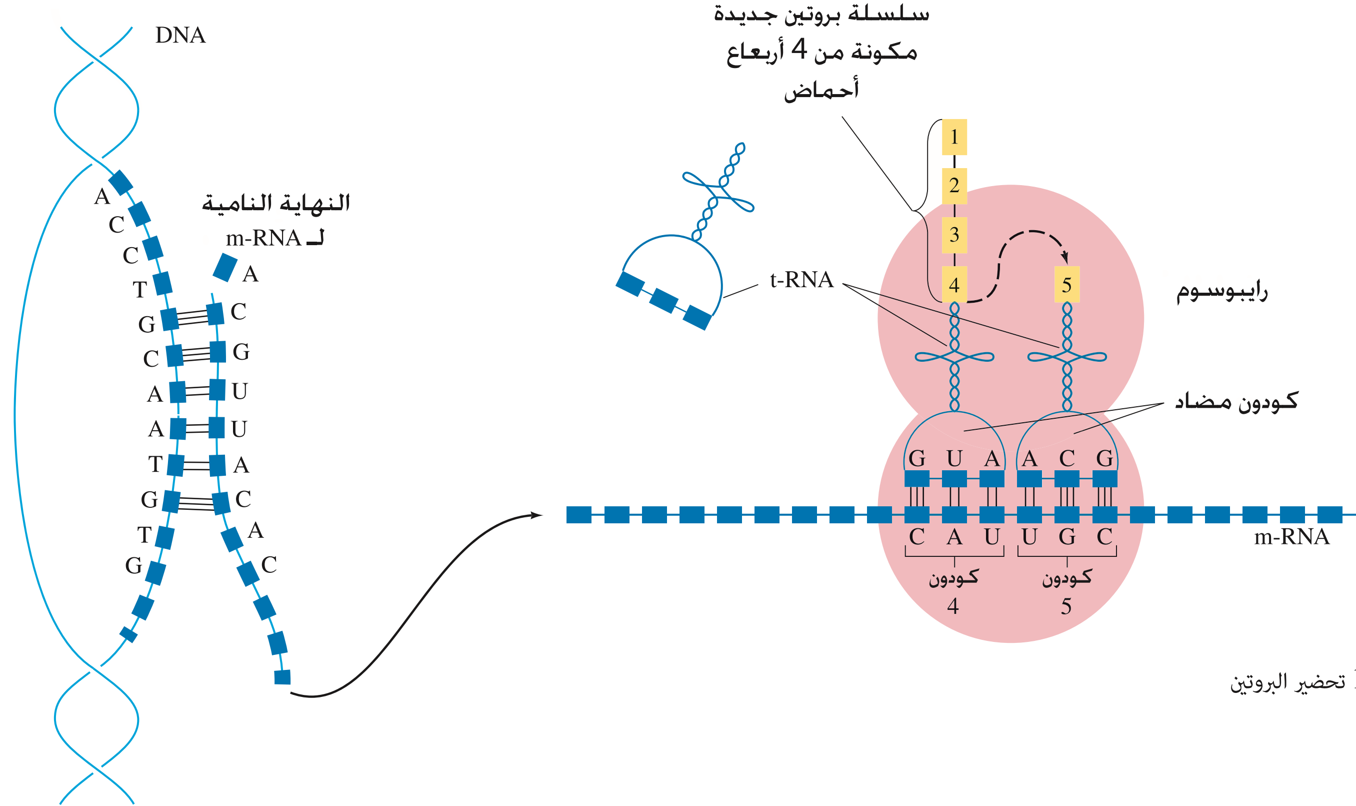
$$= -1.83 \times 10^{-20}\,\mathrm{J}$$

$$= -\frac{(1.83 \times 10^{-20}\,\mathrm{J})}{(1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})} = -0.11\,\mathrm{eV}$$

طاقة الوضع PE سالبة، وهذا يعني أنّ 0.11 eV من الشغل (أو الطاقة المدخلة) ضرورية لفصل الجزيئات. أي أنّ طاقة ربط هذه الرابطة "الضعيفة" أو الهيدروجينية هي 0.11 eV. وهذا تقديري، بالطبع، لأنّ الشحنات الأخرى في الجوار سيكون لها تأثير أيضًا.

تحضير البروتين

تعدّ الروابط الضعيفة، خصوصًا الروابط الهيدروجينية، أساسية لعملية تحضير البروتين. تخدم البروتينات كأجزاء تركيبية في الخلية، وكأنزيمات لتحفز التفاعلات الكيميائية الضرورية لنمو الكائن الحي ونجاته. يتكون جزيء البروتين من سلسلة، أو عدة سلاسل من الجزيئات الصغيرة المعروفة *بالحموض الأمينية*.



الشكل 29 – 13 تحضير البروتين

تطبيق الفيزياء
تحضير البروتين

يبيّن الرّسم التّوضيحيّ في (الشّكل 29 – 13) النموذج المعياري لكيفية اتصال الحموض الأمينية بعضها ببعض بالترتيب الصحيح لتشكيل جزيء بروتيني. وهي تبدأ عند اللولب الثنائي DNA، حيث إنّ كلّ جين على الكرموسوم يحتوي المعلومات اللازمة لإنتاج أحد البروتينات. وترتيب القواعد الأربع، A، و C، و G، و T يزود "الشفرة" و "الشفرة الجينية" لترتيب الحموض الأمينيّة في البروتين. أولًا، يقوم اللولب الثنائي DNA بالامتداد. ويتم تحضير جزيء جديد "كقالب" يدعى مرسال RNA (m–RNA) باستخدام حبل واحد من DNA. أما m–RNA فهو جزيء سلسلة يحتوي على أربع قواعد مختلفة. تشبه قواعد DNA مع استبدال الثيامين (T) ليحلّ بدلا منه جزيء مشابه له يُدعى جزيء يوراسيل (U). في (الشكل 29 – 13)، تم إضافة C إلى سلسلة m–RNA النامية بالطريقة نفسها التي ينسخ DNA بها نفسه (الشكل 16 – 45). و A المنجذبُ والمُمسكُ فيه قريبًا من T في سلسلة DNA بواسطة القوّة الكهروستاتيكية. يتمّ لصقه بعد فترة قصيرة بـ C بواسطة الأنزيم. أمّا ترتيب القواعد، وما ينجم عن ذلك من معلومات جينية، فتحفظ في m–RNA. وتبدأ m–RNA بالتخبط والاهتزاز في الخلية (تذكر النظرية الحركية) إلى أن تصبح قريبة من جزيئة عضوية متناهية في الصغر تُسَمّى الرايبوسوم، والتي يمكن أن تلتصق فيها بواسطة التجاذب الكهروستاتيكي (الشكل 29 – 13). وكذلك يُمسك بواسطة القوة الكهروستاتيكية مع الرايبوسوم جزيء أو جزيئان من RNA الناقل (t–RNA). وهذه الجزيئات t–RNA "تحوّل" الشفرة الجينية من قواعد النويدات إلى حموض أمينية بالطريقة التالية. فهناك جزيء t-RAN مختلف لكلّ تجمع من ثلاث قواعد. فتكون مضادات الرموز الوراثية عند أحد طرفي جزيء t–RNA "المضاد الوراثي". وهو مجموعة من ثلاث قواعد للنويدات. وإذا توافقت القواعد الثلاث لمضادات الرموز الوراثية جميعها (بناء على G إلى C، و A إلى U) مع القواعد الثلاث "للرموز الوراثية" على m–RNA عند التصاقها بالرايبوسوم، فإنّ مضادات الرموز الوراثية ستنجذب بطريقة كهروستاتيكية إلى الرموز الوراثية لـ m–RNA وستُمْسَك هناك لفترة قصيرة. أمّا على الطرف الآخر لجزيء t–RNA فيوجد الحمض النووي المناسب. ويمتلك الرايبوسوم موقعين خاصين للالتصاق يمكن أن يلتصق فيهما جزيئان t–RNA، في حين تصل الأنزيمات حموضها الأمينية معًا لإطالة سلسلة الحمض النووي (ذات اللون الأصفر في الشكل 29 – 13). وبينما يلتصق كلّ حمض أميني بواسطة أنزيم (هناك أربعة قد تم توصيلها سابقا في (الشكل 29 – 13)، والخامس على وشك التوصيل)، يتم إزالة جزيء t–RNA القديم – ربّما بواسطة تصادم عشوائي مع جزيء ما في المائع الخلوي. لينجذب بعد ذلك بقليل جزيء جديد، في حين يتحرك الرايبوسوم على امتداد m–RNA.

تقدم هذه العملية من تحضير البروتين – غالبا- كما لو أنها حدثت بطريقة عمل الساعة الدقيقة. أو أنّ كلّ جزيء قد عرف دوره تماما فذهب إلى مكانه المحدّد له. ولكن ليس هذا هو ما يحدث. إنّ قوى التجاذب بين الشحنات الكهربائية للجزيئات ضعيفة كثيرا. وتصبح ذات تأثير عندما تستطيع الجزيئات الاقتراب من بعضها فقط. وعندما يمكن تكوين عدة روابط ضعيفة. وبالفعل. إذا لم تكن الأشكال صحيحة كما يجب. فلن يكون هناك أيّ تجاذب كهروستاتيكي. وهذا هو السبب في وجود أخطاء قليلة. والواقع أنّ كون الروابط ضعيفة مهم جدّا. فلو أنها كانت قوية. فإنّ التصادمات مع الجزيئات الأخرى لن تسمح لجزيء t–RNA بالانفلات من الرايبوسوم. أو انفلات m–RNA من DNA. ولو أنها لم تكن حوادث مؤقتة. لنتج من ذلك توقف عملية الأيض تماما.

شكل البروتين

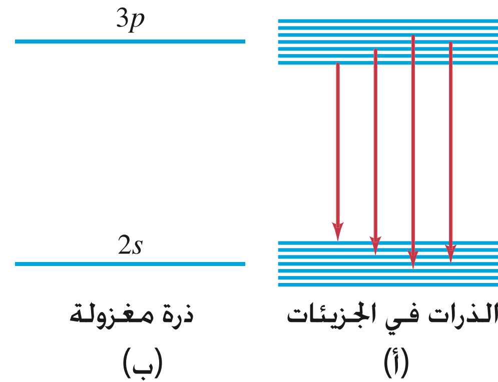
وكلما أضيف حمض نووي إلى سابقه. يزداد طول جزيء البروتين إلى أن يصبح كاملا. وحتى خلال تكونه. فإنّ هذه السلسلة ستهتز بشدة. وتتلاطم خلال محيطها الخلوي؛ ويمكننا التفكير فيها وكأنها دودة ملتوية. يمتلك جزيء البروتين مجموعات قطبية مشحونة كهربائيّا على امتداد طوله. وخلال اتخاذها أشكالا مختلفة. فإنّ قوى التجاذب الكهربائية تعمل بين أجزاء الجزيء المختلفة بالدفع باتجاه تركيب معين يكون مستقرًا تمامًا في نهاية الأمر. وكلّ نوع من البروتين له شكل خاص فيه. اعتمادا على موضع الذرات المشحونة. وفي آخر تحليل. فإنّ الشكل النهائي سيعتمد على ترتيب الحموض النووية.

* 4-29 الأطياف الجزيئيّة

عندما تتجمع الذرات لتشكّل جزيئات. تتداخل التوزيعات الاحتمالية للإلكترونات الخارجية. فيغير هذا التفاعل من مستويات الطاقة. ومع هذا. فيمكن للإلكترونات أن تمر بانتقالات بين مستويات طاقة إلكترونية كما تفعل الذرات. وعلى سبيل المثال. يمكن لجزيء H_2 أن يمتص فوتونًا ذا تردد مناسب ليهيّج فيه أحد إلكتروناته من الحالة الأرضية إلى حالة مهيجة (مثارة). ويستطيع الإلكترون المهيّج عندئذ العودة إلى الحالة الأرضية. باعثا فوتونا. وطاقة الفوتونات المنبعثة بواسطة الجزيئات لها المقدار المنبعث نفسه من الذرات؛ في العادة 1 إلى 10 eV.

ويتاح للجزيئات. وليس للذرات. مستويات طاقة إضافية متوافرة بسبب قدرة الجزيء ككلّ على الدوران. وتستطيع ذرات الجزيء أن تهتز نسبة لبعضها بعضا. إنّ مستويات الطاقة لكلّ من المستويات الاهتزازية والدورانية مكمية. وهي تبعد عن بعضها مسافات أقلّ بكثير (10^{-3} eV إلى 10^{-1} eV) من المستويات الإلكترونية بشكل عام. ويصبح عندئذ كلّ مستوى طاقة ذري مجموعة من المستويات القريبة من بعضها ناجمة من الحركتين الاهتزازية والدورانية (الشكل 29 – 14). تظهر الانتقالات من مستوى إلى آخر كخطوط كثيرة قريبة جدّا من بعضها. وفي الواقع. لا يمكن تمييز الخطوط من بعضها دائما. وتدعى هذه الأطيافُ **أطيافَ الحزمة**. ولأنواع الجزيئات جميعها أطياف مميزة. يمكن استخدامها لتمييزها ولتحديد تركيبها. وسنناقش الآن تفصيلات أكثر من الحالات الدورانية و الاهتزازية في الجزيء.

الشكل 29 – 14 (أ) مستويات الطاقة الفردية لذرة معزولة تصبح (ب) حزمًا من مستويات قريبة من بعضها بعضا في الجزيئات، وكذلك في المواد الصلبة والسائلة.



*مستويات الطاقة الدورانية في الجزيئات

نعتمد هنا فقط الجزيئات ثنائية الذرة، على الرغم من إمكانية امتداد التحليل إلى الجزيئات متعددة الذرة. وعندما يدور الجزيء ثنائي الذرة حول مركزه الكتلي كما هو مبين في (الشكل 29 – 15)، فإنّ طاقة حركته الدورانية (انظر البند 8 – 7) تعطى كالتالي:

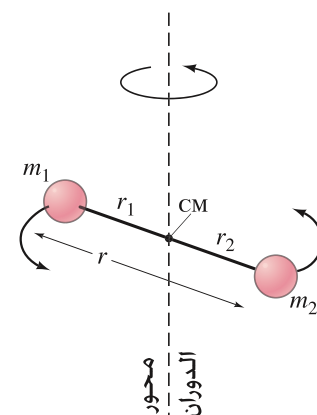
$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{(I\omega)^2}{2I}$$

حيث تمثل $I\omega$ الزخم الزاوي (البند 8 – 8). وتتنبأ الميكانيكا الكمية بتكمية الزخم الزاوي تمامًا كما في الذرات (انظر المعادلة 28 – 3).

$$I\omega = \sqrt{L(L+1)}\,\hbar, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots$$

حيث L عدد صحيح يُدعى **عدد الزّخم الزّاويّ الكمّيّ الدّورانيّ**. ولذلك، فإنّ الطاقة الدورانية مكمية:

$$E_{\text{rot}} = \frac{(I\omega)^2}{2I} = L(L+1)\frac{\hbar^2}{2I}, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(1 – 29)}$$



الشكل 29 – 15 جزيء ثنائي الذرة يدور حول محور رأسي.

وتخضع الانتقالات بين مستويات الطاقة الدورانية لقاعدة الانتقاء (كما في البند 28 – 6): $\Delta L = +1$.

قاعدة انتقاء (مستويات دورانية)

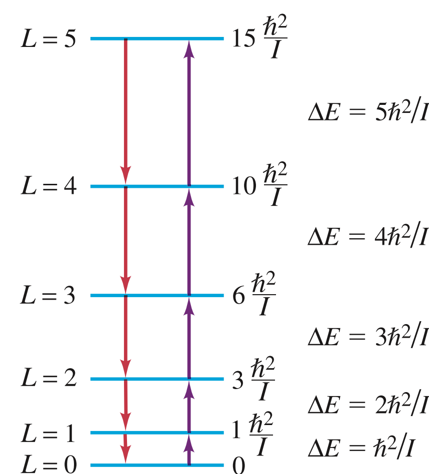
طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص لانتقال بين حالات دورانية ذات عدد زخم زاوي كمي L و $L-1$ ستكون

$$\Delta E_{\text{rot}} = E_L - E_{L-1} = \frac{\hbar^2}{2I}L(L+1) - \frac{\hbar^2}{2I}(L-1)(L)$$

$$= \frac{\hbar^2}{I}L \qquad [\text{لمستوى الطاقة العلوي } L] \qquad \textbf{(2 – 29)}$$

ونرى أنّ طاقة الانتقال تزداد مباشرة مع L. يبين (الشكل 29 – 16) بعض مستويات الطاقة الدورانية والانتقالات المسموح بها. وتقع خطوط الامتصاص التي قيست في منطقتي الميكروويف وتحت الحمراء من الطيف، وتردداتها بشكل عام هي: 2، أو 3، أو 4 ... أضعاف أعلى من أخفض واحد، كما تنبأت به (المعادلة 29 – 2).

الشكل 29 – 16 مستويات طاقة دورانية وانتقالات مسموح فيها (انبعاث وامتصاص) لجزيء ثنائي الذرة. الأسهم المشيرة إلى الأعلى تمثل امتصاص فوتون، والأسهم المشيرة إلى الأسفل تمثل انبعاث فوتون.



المثال 29-2 الانتقال الدوراني

للانتقال الدوراني من $L = 1$ إلى $L = 0$ للجزيء CO، فإنّ طول موجة امتصاص مقيس يعادل $\lambda_1 = 2.60\ \text{mm}$ (وهذا ضمن منطقة المايكروويف). استخدم هذا لتحسب ما يلي: (أ) عزم القصور (أو الاستمرارية) لجزيء CO. (ب) طول رابطة CO، r.

النهج: إذا تمّ استخدام طول موجة الامتصاص لإيجاد طاقة الفوتون الممتص، فعندئذ نستطيع حساب عزم القصور (أو الاستمرارية)، I، من (المعادلة 2 – 29). ويرتبط عزم القصور (أو الاستمرارية) بالمسافة الفاصلة في CO (طول الرابطة r).

الحلّ: (أ) طاقة الفوتون، $E = hf = hc/\lambda$، تساوي فرق مستوى الطاقة الدوراني، ΔE_{rot}. ونستطيع أن نكتب من (المعادلة 29 – 2)

$$\frac{\hbar^2}{I}L = \Delta E_{\text{rot}} = hf = \frac{hc}{\lambda_1}$$

ومع $L = 1$ (الحالة العلوية) في هذه الحالة، نحلّ لإيجاد I:

$$I = \frac{\hbar^2 L}{hc}\lambda_1 = \frac{h\lambda_1}{4\pi^2 c} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(2.60 \times 10^{-3}\ \text{m})}{4\pi^2(3.00 \times 10^8\ \text{m/s})}$$
$$= 1.46 \times 10^{-46}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

(ب) يدور الجزيء حول مركزه الكتلي (CM) كما هو مبين في (الشكل 29 – 15). افرض أنّ m_1 تمثل كتلة ذرة C، $m_1 = 12\ \text{u}$، وافرض كذلك أنّ m_2 تمثل كتلة O، $m_2 = 16\ \text{u}$. المسافة إلى مركز الثقل CM من الذرة C، وهي r_1 في (الشكل 15 – 29)، معطاة بواسطة صيغة CM، (المعادلة 7 – 9):

$$r_1 = \frac{0 + m_2 r}{m_1 + m_2} = \frac{16}{12 + 16}r = 0.57r$$

وتبعد الذرة O مسافة $r_2 = r - r_1 = 0.43r$ من CM.

عزم القصور (أو الاستمرارية) لجزيء CO حول CM هو (انظر المثال 8 – 10)

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2$$
$$= [(12\,\text{u})(0.57r)^2 + (16\,\text{u})(0.43r)^2][1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg/u}]$$
$$= (1.14 \times 10^{-26}\,\text{kg})r^2$$

ونحلّ لإيجاد r. ونستخدم النتيجة من الجزء (أ) لإيجاد I :

$$r = \sqrt{\frac{1.46 \times 10^{-46}\,\text{kg}\cdot\text{m}^2}{1.14 \times 10^{-26}\,\text{kg}}} = 1.13 \times 10^{-10}\,\text{m} = 0.113\,\text{nm}$$

التمرين أ: ما أطوال الأمواج للانتقالات الدورانية الثلاثة التالية لـ CO؟

*مستويات الطاقة الدورانية في الجزيئات

إنّ طاقة الوضع للذرتين في جزيء ثنائي اعتيادي لها الهيئة المبينة في (الشكلين 29 – 8 و 29 – 2). ويبين (الشكل 29 – 17) مرة أخرى PE لجزيء H_2 (المنحنى المتصل). ومنحنى PE هذا، على الأقل بالقرب من مسافة الاتزان الفاصلة r_0، يماثل طاقة الوضع لمتذبذب توافقي، $\text{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، والمبين متراكبًا في خطوط متقطعة. ولذلك، لإزاحات صغيرة من r_0، تشعر كلّ ذرة بقوة إرجاع تتناسب مع الإزاحة تقريبا، ويهتز الجزيء كهزاز توافقي بسيط (SHO) (انظر الفصل 11).

الشكل 29 – 17 طاقة وضع لجزيء H_2 ولهزاز توافقي بسيط ($\text{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، مع $|x| = |r - r_0|$)

وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ مستويات الطاقة الممكنة مكمّية حسب

$$E_{\text{vib}} = (\nu + \tfrac{1}{2})hf, \qquad \nu = 0, 1, 2, \cdots, \qquad \textbf{(29 – 3)}$$

وتمثل f التردد التقليدي (انظر الفصل 11 – تعتمد f على كتلة الذرتين وكذلك على شدّة الرابطة أو "الصّلابة") و يمثل ν عددا صحيحا يدعى العددَ الاهتزازيَّ الكمّيّ. إنّ أقلّ حالة طاقة $(\nu = 0)$ ليست صفرا (كما في الدوران)، ولكنها تمتلك $E = \frac{1}{2}hf$. وتُسمّى هذه طاقةَ النقطة – صفر . والحالات الأعلى لها طاقة $\frac{3}{2}hf, \frac{5}{2}hf$، وهكذا دواليك، كما هو مبين في (الشكل 29 – 18). تخضع الانتقالات لقاعدة الانتقاء:

قاعدة انتقاء (طاقة اهتزازية)

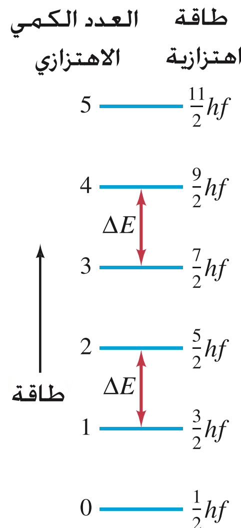
$$\Delta\nu = \pm 1$$

لذا، فإنّ الانتقالات المسموح بها تحدث بين الحالات المتجاورة فقط ، وجميعها تصدر فوتونات ذات طاقة

$$\Delta E_{\text{vib}} = hf \qquad \textbf{(29 – 4)}$$

وهذا قريب جدًّا من القيم العملية عند قيم ν الصغيرة، ولكن عند الطاقات الأعلى، يبدأ منحنى PE (الشكل 29 – 17) بالانحراف عن منحنى SHO التالي، وعندئذ يؤثر هذا بدوره في أطوال أمواج الانتقالات وتردداتها. وطاقات الانتقال الاعتيادية هي على قدر 10^{-1} eV، حوالي 10 مرّات أكبر من طاقات الانتقالات الدورانية، مع أطوال أمواج في المنطقة تحت الحمراء من الطيف $(\approx 10^{-5}\,\text{m})$.

الشكل 29 – 18 طاقات اهتزازية مسموح بها لجزيء ثنائي الذرة، حيث f هو التردد الأساس للاهتزاز (انظر الفصل 11). مستويات الطاقة متساوية الأبعاد. الانتقالات مسموح بها بين المستويات المتجاورة فقط $(\Delta\nu = \pm 1)$.



المثال 29-3 مستويات الطّاقة الاهتزازيّة في الهيدروجين

تبعث اهتزازات جزيء الهيدروجين أشعة تحت حمراء طول موجتها 2300 nm تقريبا.
(أ) ما الفرق في الطاقة بين المستويات الاهتزازية المتجاورة؟ (ب) ما أخفض طاقة حالة اهتزازية ؟

النّهج: الطاقة الفاصلة بين المستويات الاهتزازية المتجاورة هي (المعادلة 29 – 4) $\Delta E_{\text{vib}} = hf = hc/\lambda$ أخفض طاقة (المعادلة 29 – 3) لها $\nu = 0$.

الحل: (أ)

$$\Delta E_{\text{vib}} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(2300 \times 10^{-9}\,\text{m})(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 0.54\,\text{eV}$$

حيث يحتوي المقام على معامل التحويل من جول إلى eV.

(ب) تمتلك أخفض طاقة اهتزازية $\nu = 0$ حسب (المعادلة 29 – 3):

$$E_{\text{vib}} = (\nu + \tfrac{1}{2})hf = \tfrac{1}{2}hf = 0.27\,\text{eV}$$

التمرين ب: ما طاقة أوّل حالة اهتزازية فوق الحالة الأرضية في جزيء الهيدروجين؟

* 5-29 التّرابط في المواد الصّلبة

قدّمت الميكانيكا الكمية مساهمة عظيمة لفهم تركيب المواد الصلبة. ويُدعى حقل الأبحاث النشط في أيامنا هذه **فيزياء الحالة – الصلبة**، أو **فيزياء المادة – المكثفة** لكي تضم السوائل أيضًا. وقد تم تخصيص بقية هذا الفصل لهذا الموضوع. وسنبدأ بنظرة مختصرة إلى تركيب المواد الصلبة والروابط التي تمسكها معا.

وبسبب أنّ بعض المواد الصلبة غير متبلورة في تركيبها (كالزجاج)، حيث لا تبدي ذراتها أو جزيئاتها أيّ ترتيب بعيد المدى، فإننا سنهتم بالصنف الآخر من المواد البلورية التي تشكل ذراتها أو أيوناتها أو جزيئاتها، بشكل عام مقبول، مصفوفة مرتبة في توزيع هندسي يعرف بالشبكة. يظهر (الشكل 29 – 19) ثلاثة من التوزيعات المكنة للذرات في البلورة هي: مكعب بسيط، ومكعب مركز وجها، ومكعب مركز جسما. إنّ بلورة NaCl هي مكعب مركز وجها، مع أيون واحد من Na^+ أو Cl^- عند كلّ نقطة شبكة (انظر الشكل 29 – 20).

يتم ربط جزيئات المادة الصلبة مع بعضها بعدة طرق. وأكثر هذه الطرق شيوعًا الرابطتان التساهمية (كما هو بين ذرات الكربون في بلورة الألماس) والأيونية (كما في بلورة NaCl). وغالبًا ما تكون الروابط جزئيّا تساهمية وجزئيّا أيونية . إنّ نقاشنا السابق في هذا الفصل عن هذه الروابط في الجزيئات ينطبق تماما على المواد الصلبة.

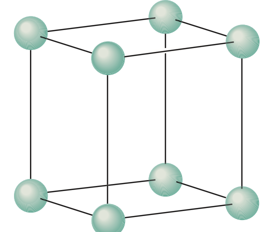
والآن، دعنا ننظر إلى بلورة NaCl في (الشكل 29 – 20). يشعر كلّ أيون Na^+ بطاقة جذب كولومية ناجّة من ستة "أقرب جارات" أيونات Cl^- المحيطة به. ولاحظ عدم امتلاك أيّ أيون Cl^- لأيّ أيون Na^+ بشكل تام. وعليه، يجب ألا نفكر في المواد الصلبة الأيونية كما لو أنها تتكوّن من جزيئات منفردة. كما أنّ كلّ Na^+ يشعر أيضًا بطاقة تنافر كولومية ناجّة من أيونات Na^+ الأخرى، بالرغم من أنها أضعف؛ لأنّ أيونات Na^+ أكثر بعدا.

وهناك نوع مختلف من الروابط، لم يناقش في (البند 29 – 1)، يحدث في الفلزات. وللذرات الفلزية إلكترونات خارجية ضعيفة الارتباط (نسبيّا) بذراتها. وتقترح نظريات **الروابط الفلزية** في المادة الصلبة الفلزية، تجوّل الإلكترونات الخارجية بحرية بين الذرات الفلزية جميعها، تاركة ذراتها دون إلكترونات خارجية، أيونات موجبة. وقد يكون التجاذب الكهروستاتيكي بين أيونات الفلز وهذا "الغاز" الإلكتروني السالب، على الأقل، مسؤولا جزئيّا عن إمساك المادة الصلبة مع بعضها. إنّ طاقة الترابط للروابط الفلزية هي 1 إلى 3 eV عادة ، وهي أضعف من الروابط الأيونية أو التساهمية (5 إلى 10 eV، في المواد الصلبة) نوعا ما. و"الإلكترونات الحرّة" هي المسؤولة عن كلّ من التوصيلين الكهربائي والحراري العالي للفلزات. وتفسّر هذه النظرية بشكل جيد لمعان السّطوح الفلزية الناعمة؛ تستطيع الإلكترونات الحرّة أن تهتز عند أيّ تردّد، فعندما يسقط ضوءٌ له مدى من الترددات على فلز ما، تستطيع الإلكترونات عندئذٍ أن تهتز متجاوبة لتعيد انبعاث الضوء بالترددات نفسها. لذا، فإنّ الضوء المنعكس سيتكوّن بشكل كبير من ترددات الضوء الساقط نفسها. وإذا قورن هذا مع المواد غير الفلزية التي تظهر لونا ميزا، فإنّ الإلكترونات الذرية توجد في حالات طاقة معينة فقط، وعندما يسقط ضوء أبيض عليها، تبدأ الذرات بالامتصاص عند ترددات معينة، وتعكس الترددات الأخرى التي تكون اللون الذي نراه.

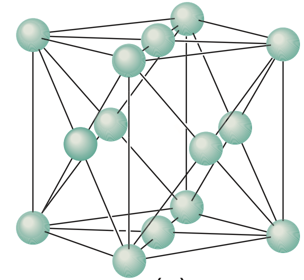
وفيما يلي مقارنة مختصرة لروابط قوية مهمة:

- أيونيـــــة: يُخطف إلكترونٌ من ذرة بواسطة أخرى.
- تساهميّة: تتشارك ذرات الجزيء الواحد بالإلكترونات.
- فلــــزّية: تتشارك الذرات في الفلز جميعها بالإلكترونات.

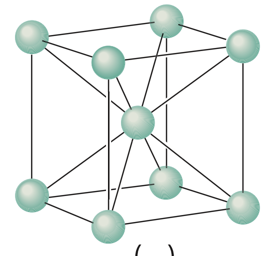
يمكن أن تشكّل ذرات بعض المواد أوجزيئاتها، مثل الغازات النبيلة، **روابط ضعيفة** مع بعضها بعضا. وكما رأينا في (البند 29 – 3)، فإنّ الروابط الضعيفة لها طاقات ربط ضعيفة جدّا، ومن غير المتوقع نتيجة لذلك أن تمسك الذرات مع بعضها لتشكّل سائلًا أو مادة صلبة عند درجة حرارة الغرفة. وتتكاثف الغازات النبيلة عند درجات حرارة منخفضة فقط، حيث الطاقة الذرية الحركية (الحرارية) صغيرة ليستطيع عندئذٍ التجاذب الضعيف من إمساك الذرات مع بعضها.



(أ)



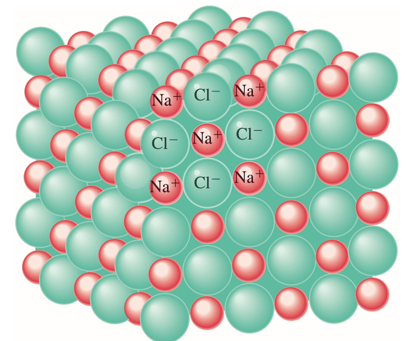
(ب)



(جـ)

الشّكل 29 – 19 ترتيب الذرات في (أ) بلورة مكعب بسيط. (ب) بلورة مكعبة مركزية الوجه (لاحظ أن الذرة عند مركز كلّ وجه). (جـ) بلورة مركزية الجسم. ويبين كلّ رسم تخطيطي العلاقة بين الروابط. وكلّ من هذه "الخلايا" تتكرر في ثلاثة أبعاد وحتى حواف البلورة الجاهريّة.

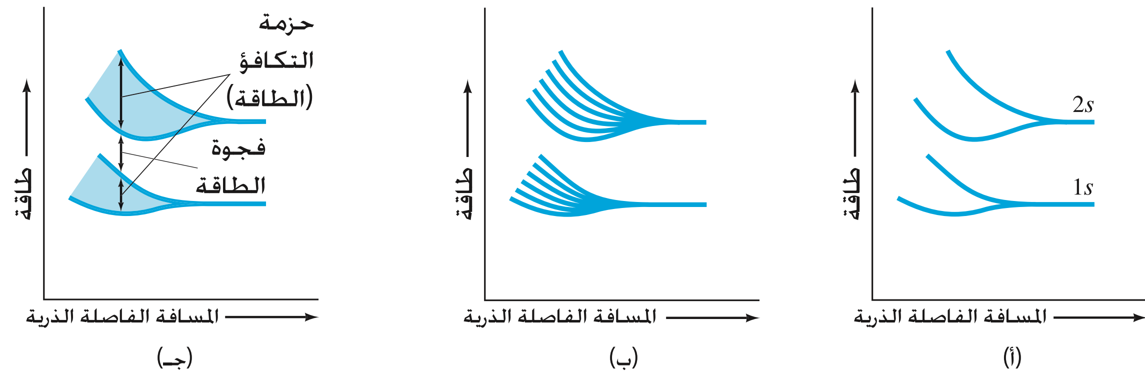
الشّكل 29 – 20 رسم تخطيطي لبلورة NaCl، تظهر "تراصّ" الذرات.



* 6-29 نظرية الحزم للمواد الصّلبة

حزم الطاقة

لقد رأينا في (البند 29 − 1) أنّه عندما تقترب ذرتا هيدروجين من بعضهما، تتداخل الدوال الموجية، وتنقسم الحالتان $1s$ (واحدة من كلّ ذرة) إلى حالتين لهما الطّاقة نفسها. (وكما رأينا ، واحدة فقط من هاتين الحالتين،$S = 0$، لها طاقة منخفضة بما فيه الكفاية لتكون جزيء هيدروجين H_2 مترابطا). يظهر (الشكل 29 − 21) أ هذا الوضع للحالتين $1s$ و $2s$ لذرتين. وإذا اقتربت الذرتان من بعضهما (باتجاه يسار المنحنى)، فستنشطر الحالتان $1s$ و $2s$ إلى مستويين. ولكن عند اقتراب ست ذرات من بعضها، كما في (الشكل 29 − 21 ب)، تنشطر كلّ من هذه الحالات إلى ستة مستويات. أمّا إذا اقترب عدد كبير من الذرات من بعضها بعضا لتشكل مادة صلبة، فيصبح عندئذٍ كلّ من مستوياتها الذرية الأصلية **حزمة** كما هو مبين في (الشكل 29 − 21 جـ). إنّ مستويات الطاقة قريبة جدّا من بعضها في كلّ حزمة لتبدو وكأنها مستمرة بشكل مطلق. وهذا هو السبب في أنّ طيف الأجسام الصلبة المسخنة (البند 27 − 2) يبدو مستمرًا.



الشكل 29 − 21 انشطار مستويات الطاقة الذرية $1s$ و $2s$ عندما (أ) تقترب ذرتان من بعضهما بعضًا (تقلّ المسافة الفاصلة الذرية باتجاه يسار المنحنى). (ب) الشيء نفسه لستّ ذرات. (جـ) لعدة ذرات عندما تقترب مجتمعة لتشكل مادة صلبة.

موصلات

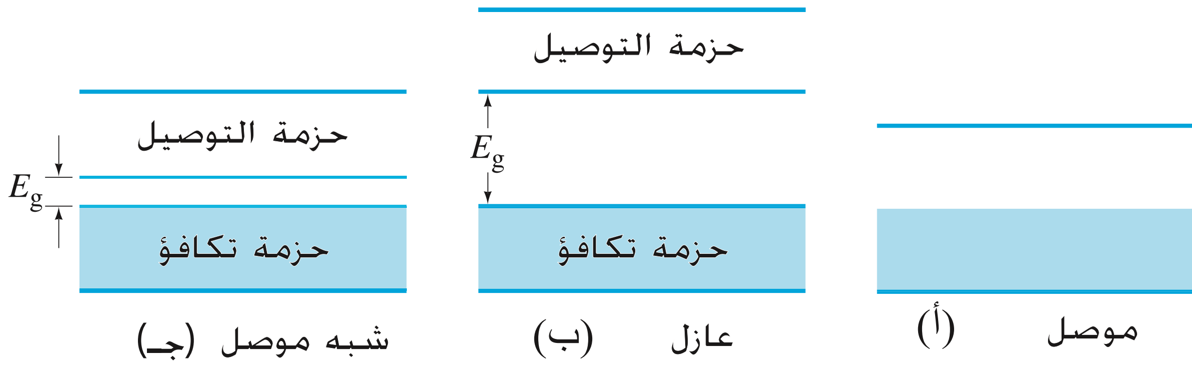


الشكل 29 − 22 حزم الطاقة للصوديوم

تكمن الصفة المميزة للموصل الجيد في أنّ أعلى حزمة طاقة تكون مملوءة جزئيًّا. خذ بالحسبان الصوديوم، على سبيل المثال، والمبينة حزم طاقته في (الشكل 29 − 22). الحزم $1s$، و $2s$ ، و $2p$ مملوءة (تماما كما في ذرة Na) ولا تهمنا هنا. ورغم ذلك، فإنّ الحزمة $3s$ نصف مملوءة. لماذا؟ تذكر أنّ مبدأ الاستبعاد يشترط أنه في ذرة ما، يستطيع إلكترونان فقط أن يكونا في الحالة $3s$، حيث يكون غزل أحدهما إلى الأعلى والآخر إلى الأسفل. وتختلف طاقة هاتين الحالتين عن بعضهما قليلا. ولمادة صلبة مكونة من N ذرة، ستحتوي الحزمة $3s$ على $2N$ حالات طاقة محتملة. إنّ ذرة الصوديوم لها في $3s$ إلكترون وحيد. ولذلك، ففي عينة من فلزّ الصوديوم تحتوي على N من الذرات، هناك N من الإلكترونات في الحزمة $3s$ و N حالات غير مأهولة. وعند تسليط فرق جهد على الفلزّ تستطيع الإلكترونات أن تتجاوب عن طريق التسارع وزيادة طاقتها؛ بسبب وجود كثير من الحالات غير المأهولة ذات الطاقة المتوافرة الأعلى بقليل. لذا، فإنّ التيار سينساب بسهولة ليكون الصوديوم موصلا جيدًا. والصفة المميزة للموصلات الجيدة جميعها هي أنّ الحزمة ذات الطاقة الأعلى مملوءة جزئيًّا فقط، أو تتداخل حزمتان لتصبح الحالات غير المأهولة متوافرة . ومثال على الحالة الأخيرة، الماغنيسيوم الذي يمتلك إلكتروني $3s$، فيجعل ذلك الحزمة $3s$ مملوءة. إلّا أنّ الحزمة $3p$ غير المملوءة تتداخل مع الحزمة $3s$ بالطاقة. لذا، هناك كثير من الحالات المتوافرة للإلكترونات لتتحرك إلى داخلها. وبذلك يكون الماغنيسيوم موصلًا جيدًّا أيضًا.

عوازل
حزمتا التوصيل و التكافؤ
فجوة طاقة

وفي مادة جيدة **العزل** (عازلة)، على الوجه الآخر، فإنّ أعلى حزمة تحتوي على إلكترونات تكون مملوءة تماما، وتسمى **حزمة التكافؤ**. أمّا حزمة الطاقة الأعلى التالية المسماة **حزمة التوصيل**، فهي مفصولة عن حزمة التكافؤ بواسطة **طاقة فجوة "ممنوعة"** (أو **فجوة الحزمة**)، E_g، وهي في العادة 5 إلى 10 eV. لذا، فعند درجة حرارة الغرفة، (300 K) حيث الطاقات الحرارية (أي، متوسط الطاقة الحركية — انظر الفصل 13) $\frac{3}{2}kT \approx 0.04\,\text{eV}$ لن يكون هناك أيّ إلكترون يستطيع اكتساب الطاقة (5 eV) الضرورية للوصول إلى حزمة التوصيل تقريبًا. وعند تسليط فرق جهد على المادة، لن يكون هناك أيّ حالات متوافرة تستطيع الإلكترونات الوصول إليها، ولن ينساب أيّ تيار. ولهذا السبب، تعدّ المادة عازلا جيدّا.



الشّكل 29 – 23 حزم الطاقة لـ : (أ) موصل. (ب) عازل، يمتلك فجوة طاقة كبيرة E_g. (جـ) شبه موصل، يمتلك فجوة طاقة صغيرة E_g. التظليل يمثل حالات مأهولة. يمثل التظليل الباهت في (جـ) إلكترونات تستطيع الانتقال من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل نتيجة التهيج الحراري عند درجة حرارة الغرفة (مبالغ فيه).

أشباه موصلات (نقية)

يقارن (الشّكل 29 – 23) حزم الطاقة ذات الصلة (أ) للموصلات، (ب) للعوازل، (جـ) للصنف المهمّ من المواد المعروفة **بأشباه الموصلات** أيضًا. إنّ حزم شبه الموصل النقي (أو **الضمني**)، كالسيلكون أو الجرمانيوم، هي كالعوازل، إلا أنّ حزمة التوصيل غير المملوءة تكون مفصولة عن حزمة التكافؤ المملوءة بفجوة طاقة أصغر بكثير، E_g، وعادة ما يكون مقدارها 1 eV. وعند درجة حرارة الغرفة، هناك عدد قليل من الإلكترونات تستطيع الحصول على طاقة حرارية كافية للوصول إلى حزمة التوصيل. ولذلك، فربّما ينساب تيار صغير جدًا عند تسليط فولتية (فرق جهد). وعند درجات الحرارة العالية، سيكون هناك عدد أكبر من الإلكترونات التي تمتلك طاقة كافية لتقفز فوق الفجوة. وغالبا، فإنّ هذا الأثر يستطيع أن يفعل أكثر من موازنة تأثير التصادمات الناجمة عن عدم الترتيب المرتفعة الناتج من درجات الحرارة المتزايدة. ولهذا، فإنّ المقاومة لأشباه الموصلات يمكن أن تقلّ مع ازدياد درجات الحرارة (انظر الجدول 18 – 1). ولكن هذا ليس كلّ شيء عن التوصيل لأشباه الموصلات. فعند تسليط فرق جهد على شبه موصل، تتحرك الإلكترونات القليلة في حزمة التوصيل باتجاه القطب الكهربائي الموجب. وتحاول إلكترونات حزمة التكافؤ أن تفعل الشيء نفسه، ويستطيع عدد قليل منها فعل ذلك لوجود عدد قليل من الحالات غير المأهولة، والتي تركت غير مأهولة بواسطة الإلكترونات الواصلة لحزمة التوصيل. وتُسَمّى هذه الحالات غير المملوءة بالإلكترونات **ثقوبًا**. وكلّ إلكترون في حزمة التكافؤ يملأ ثقبًا بهذه الطريقة خلال حركته باتجاه القطب الكهربائي الموجب يترك خلفه الثقب الخاص به. وبذلك، تنتقل الثقوب باتجاه القطب الكهربائي السالب. وبينما تعمد الإلكترونات على التراكم عند أحد جانبي المادّة، تعمد الثقوب على التراكم عند الجانب المعاكس. وسننظر إلى هذه الظاهرة بتفصيل أكثر في البند التالي.

ثقوب (في شبه موصل)

المثال 29-4 **حساب طاقة الفجوة.** لقد وجد أنّ الموصلية لشبه موصل معين تزداد عندما يصطدم به ضوء ذو طول موجي 345 nm أو أقصر، مما يؤدي إلى انتقال عددٍ من الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. ما مقدار طاقة الفجوة، E_g، لشبه الموصل هذا؟

النّهج: إنّ أطول طول موجيّ (أخفض طاقة) لفوتون يسبب زيادة في الموصلية هو $\lambda = 345\text{ nm}$، وطاقته $(= hf)$ تساوي طاقة الفجوة.

الحلّ: طاقة الفجوة تساوي طاقة الفوتون حيث $\lambda = 345\text{-nm}$:

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(345 \times 10^{-9}\,\text{m})(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 3.6\,\text{eV}$$

المثال المفاهيمي 29-5 **أيّ منها شفاف؟**

عند درجة حرارة الغرفة، تعادل طاقة فجوة السيلكون 1.14 eV، في حين تعادل لكبريت الخارصين (ZnS) 3.6 eV. أيّ من هاتين المادتين غير منفذة للضوء المرئي، وأيّ منهما شفاف؟

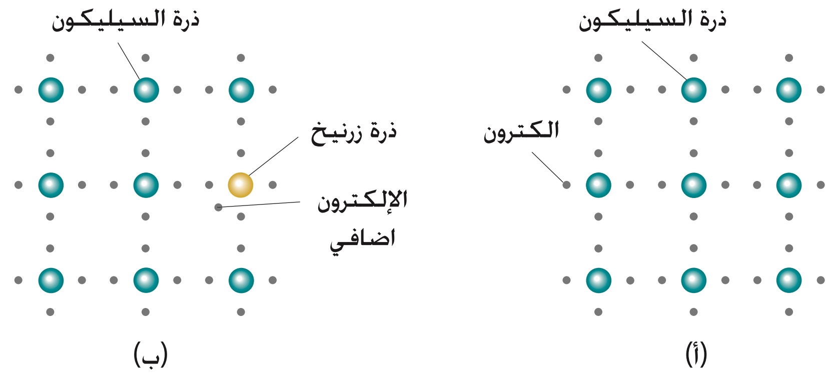
الإجابة: تمتلك فوتونات الضوء المرئي طاقات ما بين من 1.8 eV و 3.2 eV ($E = hf = hc/\lambda$ حيث يتراوح طول الموجة ما بين $\lambda = 400\text{ nm}$ و $\lambda = 700\text{ nm}$ وحيث أن أيضًا $1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$). يُمتص الضوء بواسطة الإلكترونات في المادة. وبما أنّ طاقة فجوة السيلكون صغيرة بدرجة كافية، فلن يتمكن عندها السيلكون من امتصاص هذه الفوتونات. لذا، فإنه يعمل على ضخّ الإلكترونات إلى الأعلى نحو حزمة التوصيل. إذن، فالسيلكون غير شفاف (أكمد). أمّا على الجانب الآخر، فإنّ فجوة طاقة كبريت الخارصين كبيرة جدًا، وقادرة على امتصاص الفوتونات المرئية. لذا، فإنّ الفوتونات ستمر من خلال المادة، ويقال عندئذ بأنّ هذه المادة قد تكون شفافة.

* 7-29 أشباه الموصلات والتّطعيم

تستخدم الأجهزة الإلكترونية جميعها تقريبًا هذه الأيام أشباه الموصلات. وأكثرها شيوعًا السيلكون (Si) والجرمانيوم (Ge). ولكلّ ذرة من السيلكون أو الجرمانيوم أربعة إلكترونات. تعمل على إمساك الذرات في تركيب شبكيّ بلوريّ منتظم. وهذا ما يبينه الرسم التوضيحي في (الشكل 29 – 24 أ). يكتسب كلّ من الجرمانيوم والسيلكون خصائص مفيدة للأجهزة الإلكترونية فقط عند إدخال كمية من الشوائب متناهية الصغر داخل التركيب البلوري (ربما جزء واحد من كلّ 10^6 أو 10^7). ويُسمّى هذا **تطعيم** شبه الموصل. وهناك نوعان من أشباه الموصلات يمكن صناعتهما اعتمادًاعلى نوع الشائبة المستخدمة. إذا كانت الشائبة عنصرا فإنّ ذراته تمتلك خمسة إلكترونات خارجية. كالزرنيخ (نعرض حالة مماثلة في الشكل 29 – 24 ب) علما بأنّ مواقع ذرات الزرنيخ في الشبكة البلورية هي مواقع ذرات السيلكون نفسها. تدخل أربعة إلكترونات فقط من الزرنيخ في التركيب الترابطي. أمّا الإلكترون الخامس. فلا يدخل فيه. ويستطيع التحرك بحرية نسبية. ويتصرف بصورة ما كالإلكترونات في الموصل. وبسبب هذا العدد الإضافي الصغير من الإلكترونات. يصبح شبه الموصل المطعم موصلًا تقريبًا. إنّ كثافة إلكترونات التوصيل في شبه الموصل النقي (غير المطعم) عند درجة حرارة الغرفة قليلة جدًا. وهي في العادة أقلّ من 1 لكلّ 10^9 ذرة. ومع تركيز شوائب مقداره 1 لكلّ 10^6 أو 10^7 عند التطعيم. تصبح الموصلية أكبر بكثير. ويمكن التحكم بها بدقة متناهية. وتسمى بلورة السيلكون المطعمة بالزرنيخ **شبه موصل نوع *n*** لأنّ الشحنات السالبة (الإلكترونات) هي المسؤولة عن التيار الكهربائي.

أشباه موصلات مطعمة

نوع-n



الشّكل 29 – 24 تمثيل ثنائي البعد لبلورة سيلكون. (أ) أربعة إلكترونات (خارجية) تحيط بكلّ ذرة سيلكون. (ب) بلورة سيلكون مطعمة بنسبة صغيرة من ذرات الزرنيخ: الإلكترون الإضافي لا يدخل في الشبكة البلورية. ولذلك فهو حرّ الحركة. وهذا شبه موصل من نوع-n.

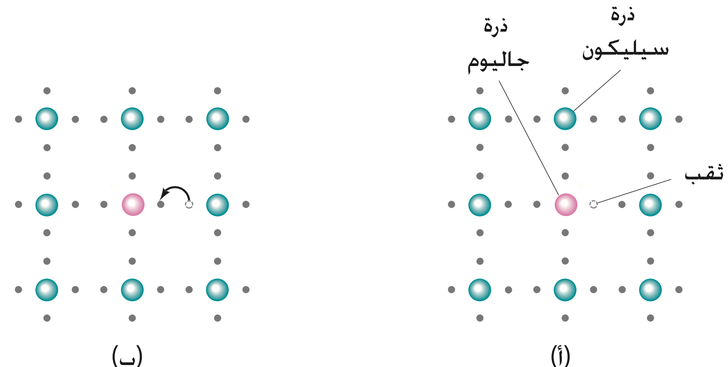
وفي **شبه الموصل نوع *p*** هناك نسبة صغيرة من ذرات ذات ثلاثة إلكترونات خارجية – **كالجاليوم**-- حلّت مكان العدد نفسه من ذرات شبه الموصل. وكما هو مبين في (الشكل 29 – 25 أ). هناك "ثقب" في تركيب الشبكة قرب ذرة الجاليوم بسبب امتلاكها ثلاثة إلكترونات خارجية فقط . وتستطيع الإلكترونات من ذرات السيلكون المجاورة أن تقفز إلى هذه الثقوب وملئها. ولكن هذا يترك ثقبًا في الموضع الذي كان يشغله الإلكترون أصلًا (الشكل 29 – 25 ب). وبما أنّ الغالبية العظمى من الذرات هي ذرات سيلكون. فإنّ الثقوب موجودة تقريبًا دائمًا بالقرب من ذرة سيلكون. وبما أنّ ذرات السيلكون تتطلب أربعة إلكترونات خارجية لتصبح متعادلة. فهذا يعني وجود شحنة موجبة صافية عند الثقب. وفي أيّ وقت يتحرك الإلكترون فيه ليملأ ثقبًا. يصبح الثقب الموجب حينها عند الموقع السابق لذلك الإلكترون. وهنا. يستطيع إلكترون آخر أن يملأ ذلك الثقب. ويكون الثقب بذلك قد انتقل إلى موقع جديد. وهكذا دواليك. ويدعى هذا النوع من أشباه الموصلات النوع *p* بسبب الثقوب الموجبة التي تبدو وكأنّها تحمل التيار الكهربائي. ومع ذلك. لاحظ أنّ كلًّا من *النوعين n و p من أشباه الموصلات لا يحمل شحنة صافية.*

نوع p

تنويه !

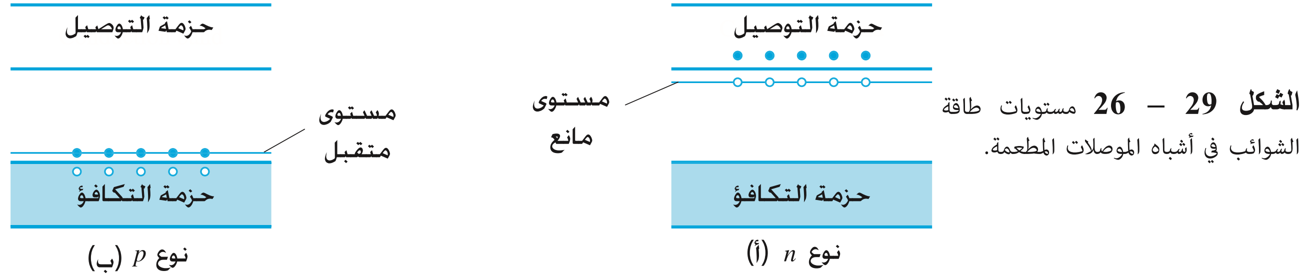
تعمل أشباه الموصلات من نوع p كما لو أنّ الشحنات الموجبة تتحرك، إلا أنّ الإلكترونات هي التي تتحرك.

الثقوب موجبة الشحنة



الشّكل 29 – 25 شبه موصل نوع p، سيلكون مطعم بجاليوم. (أ) هناك ثلاثة إلكترونات خارجية للجاليوم فقط. لذا، فهناك موقع فارغ، أو ثقب في التركيب. (ب) تستطيع الإلكترونات من ذرات السيلكون أن تقفز إلى داخل الثقب لتملأه. ونتيجة لذلك، يتحرك الثقب إلى موقع جديد (إلى اليمين في هذا الشكل)، أي إلى الموقع الأصلي للإلكترون.

حسب نظرية الحزم (البند 29 – 6)، تزود الشائبة في شبه الموصل المطعم بحالات طاقة إضافية بين الحزم كما هو مبين في (الشكل 29 – 26). وفي شبه موصل من نوع n، يقع مستوى طاقة الشائبة أسفل حزمة التوصيل مباشرة (الشكل 29 – 26 أ). وتحتاج الإلكترونات في مستوى الطاقة هذا إلى $0.05\ eV$ فقط في ذرة Si (وهي أقلّ من ذلك في الجرمانيوم) للوصول إلى حزمة التوصيل. ويعادل هذا مقدار الطاقة الحرارية، $\frac{3}{2}kT\ (= 0.04\ eV$ عند $300\ K)$. لذلك تحدث الانتقالات بسهولة عند درجة حرارة الغرفة. ولهذا، يستطيع مستوى الطاقة هذا تزويد حزمة التوصيل بالإلكترونات. وعليه، يُدعى المستوى **مانحًا**. أما في أشباه الموصلات من نوع p، فإنّ مستوى طاقة الشائبة يقع فوق حزمة التكافؤ مباشرة (الشكل 29 – 26 ب). ويُدعى المستوى آخذًا (متقبّلا)؛ لأنّ الإلكترونات من حزمة التكافؤ تستطيع القفز بسهولة إليه. وتمّ ترك الثقوب الموجبة في حزمة **التكافؤ** في الخلف. وعندما تتحرك الإلكترونات الأخرى إلى داخل هذه الثقوب، تتحرك الثقوب من مواضعها كما نوقش سابقًا.



الشكل 29 – 26 مستويات طاقة الشوائب في أشباه الموصلات المطعمة.

8-29 صمامات ثنائيّة (ديود) شبه موصلة

إنّ الصّمّامات الثنائيّة شبه الموصلة، والترانزستورات مكونات أساسيّة في الأجهزة الإلكترونيّة الحديثة. ويسمح التصغير المحقق اليوم لآلاف عديدة من الصّمّامات الثنائيّة، والترانزستورات، والمقاومات، وهكذا دواليك، أن تُوضَعَ على شريحة واحدة لا يزيد طول جانبها على ميليمتر. وسنناقش الآن، باختصار وبنوعية، عمل الصمامات الثنائية والترانزستورات.

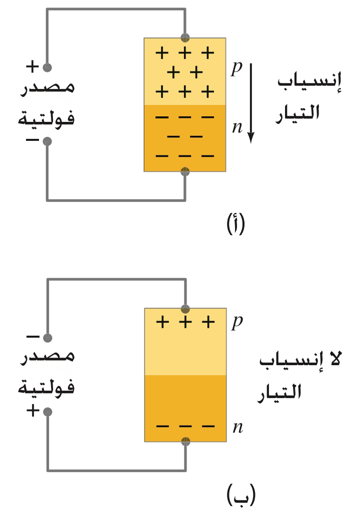
وصلة pn لصمام ثنائي

عند توصيل شبه موصل من نوع n مع شبه موصل من نوع p، تتشكّل وصلة **صمّام ثنائيّ pn** . ويُعدّ كلّ منهما متعادلا كهربائيًا عندما يكونان منفصلين. وعند وصلهما، تنتشر عدة إلكترونات قرب الوصلة من شبه الموصل نوع n إلى شبه الموصل نوع p، فتملأ ثقوبا قليلة. في حين يترك النوع n مع شحنة موجبة. أما النوع p فيكتسب شحنة سالبة صافية، ويتولد عندئذٍ فرق جهد. ويكون الجانب n موجبا بالنسبة إلى الجانب p، مما يمنع أيّ انتشار لاحق للإلكترونات.

وإذا وُصِلت بطارية بالصمام الثنائي، بحيث يوصل طرفها الموجب بالجانب p، ويوصل طرفها السالب بالجانب n كما في (الشكل 29 – 27 أ)، فإنّ الجهد المسلط الخارجي يعاكس فرق الجهد الداخلي، ليقال عندئذ إنّ الصمام الثنائي منحاز إلى الأمام. وإذا كانت الفولتية كبيرة بما فيه الكفاية (حوالي $0.3\ V$ للجرمانيوم Ge، وللسيلكون Si $0.6\ V$ عند درجة حرارة الغرفة)، فإنّ تيارًا سينساب. تُطرد الثقوب الموجبة في شبه الموصل نوع p بواسطة الطرف الموجب للبطارية، في حين تُطرد الإلكترونات في النوع n بواسطة الطرف السالب للبطارية. وتلتقي الثقوب والإلكترونات عند الوصلة، ثم تعبر الإلكترونات وتملأ الثقوب، وينساب التيار. وفي الوقت نفسه، يسحب الجانب الموجب الإلكترونات باستمرار من الجانب p، مشكلا ثقوبا جديدة، ويتم تزويد الإلكترونات بواسطة الجانب السالب عند النهاية n. وبسبب ذلك ينساب تيارٌ كبيرٌ خلال الصمام الثنائي.

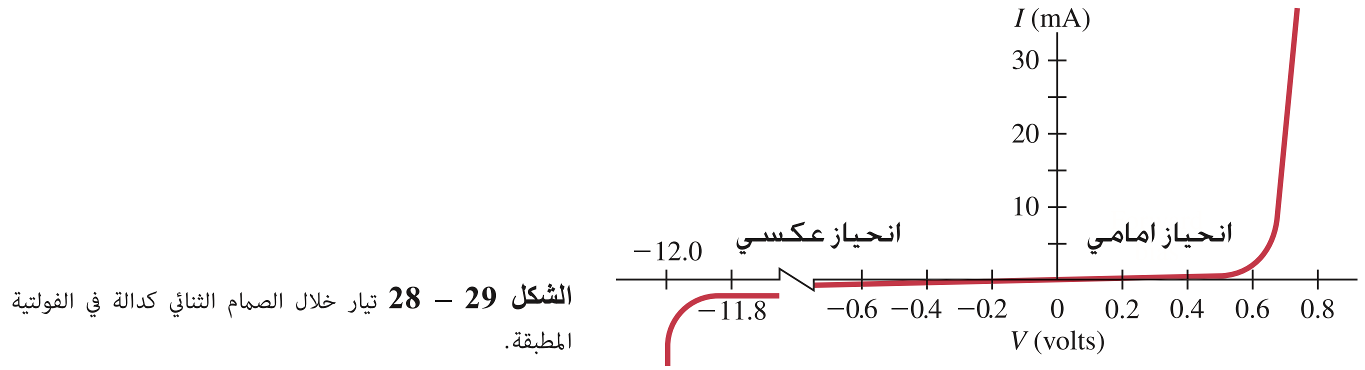
وعندما يكون الصمام الثنائي **منحازًا إلى الخلف**، كما في (الشكل 29 – 27 ب)، فإنّ الثقوب قرب الطرف p تكون منجذبة إلى الجانب السالب للبطارية، ولكن الإلكترونات قرب الطرف n تكون منجذبة إلى الجانب الموجب. ولا تلتقي ناقلات التيار قرب الوصلة، وفي الوضع المثالي، لن ينساب أيّ تيار.

يبين (الشكل 29 – 28) منحنى التيار مقابل الفولتية لصمّام ثنائيّ عاديّ. وكما ترى، فإنّ الصمّام الحقيقيّ يسمح لكمية صغيرة من التيار العكسيّ بالانسياب.* ولمعظم الأسباب العمليّة، فإنّ هذا مهمل.



الشّكل 29 – 27 رسم تخطيطي يظهر كيفية عمل صمام ثنائي شبه موصل، ينساب تيار عند وصل الفولتية في انحياز أمامي ، كما في (أ)، ولكن ليس عندما يوصل في انحياز عكسي ، كما في (ب).

*عند درجة حرارة الغرفة، يشكل هذا التيار μA قليلة في الجرمانيوم، و pA قليلة في السيلكون. يزداد التيار العكسي بسرعة مع درجة الحرارة، ويمكن أن يجعل الصّمّام الثنائي غير فاعل فوق $200°C$.



الشكل 29 – 28 تيار خلال الصمام الثنائي كدالة في الفولتية المطبقة.

المثال 29-9 صمام ثنائيّ

الصمّام الثنائيّ المبينة ميزاته في (الشكل 29 – 28). موصول على التوالي ببطارية 4.0-V ومقاومة . إذا كان لتيار 0.15 mA أن يمُرّ خلال الصمّام الثنائيّ، فما مقدار المقاومة اللازمة؟

النّهج : نستخدم (الشكل 29 – 28). لنتوصل إلى أنّ انخفاض الفولتية خلال الصمام الثنائة حوالي 0.7 V عندما يكون التيار 15 mA. وعندها نستخدم دارة تحليل بسيطة وقانون أوم (الفصلان 18 و 19).

الحلّ: إنّ انخفاض الفولتية خلال المقاومة هو

$4.0\ \text{V} - 0.7\ \text{V} = 3.3\ \text{V}$

لذا، فإنّ

$R = V/I = (3.3\ \text{V})/(1.5 \times 10^{-2}\ \text{A}) = 220\ \Omega$.

رمز الصمام الثنائي هو

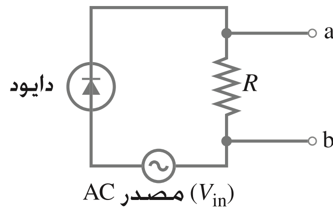


[صمام ثنائي]

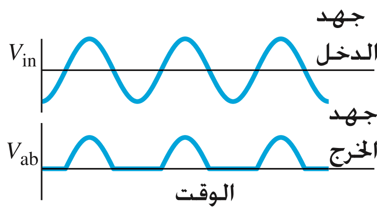
ويمثل السهم الاتجاه الاصطلاحي (+) لانسياب التيار بسهولة.

وبما أنّ وصلة الصمام الثنائي pn تسمح بانسياب التيار باتجاه واحد فقط (طالما أنّ الفولتية ليست مرتفعة)، فإنّها تستطيع أن تخدم **كمقوّم** – لتغيّر ac إلى dc. يبين (الشكل 29 – 29 أ) دارة تقويم بسيطة. يطبق مصدر ac فولتية موجبة وسالبة خلال الصمام الثنائي بالتناوب. وخلال كلّ نصف دورة فقط، سيمرّ التيار خلال الصمام الثنائي، وعندئذ فقط سيمرّ تيارٌ خلال المقاومة R. ولهذا السبب، فإنّ منحنى الفولتية V_{ab} خلال R كدالة في الزمن يظهر كالفولتية الناتجة والمبينة في (الشكل 29 – 29 ب). إنّ **موحّد نصف الموجة** هذا ليس dc تماما، ولكنه أحادي الاتجاه. والأكثر فائدة هي دارة **موحّد (مقوّم) الموجة الكاملة**، والتي تستخدم صمامين ثنائيين (وفي بعض الأحيان أربعة) كما هو مبين في (الشكل 29 – 30أ). وعند أيّ لحظة، سيوصل الصمّام الثنائيّ الأوّل أو الثاني تيارًا إلى اليمين. ولذلك، فإنّ الناتج خلال المقاومة الحمل R، سيكون كما هو مبين في (الشكل 29 – 30 ب). وحقيقة هذه هي الفولتية إذا لم تكن المكثفة C داخل الدارة. يميل المكثف إلى تخزين الشحنات، وإذا كان الثابت الزمني RC طويلا بما فيه الكفاية، فسيساعد هذا على سلاسة انسياب التيار كما هو مبين في (الشكل 29 – 30 جـ). (التغير في الناتج المبين في (الشكل 29 – 30 جـ) يدعى *الفولتية التّموّجيّة*).

تُعدّ دارات موحّد (مقوّم) الاتجاه مهمة؛ لأنّ معظم خطوط الفولتية في المنشآت هي ac، كما أنّ معظم الأجهزة الإلكترونية تتطلب فولتية dc لعملها. ولهذا السبب، توجد الصمامات الثنائة تقريبا في معظم الأجهزة الإلكترونية بما فيها أجهزة المذياع والتلفاز، والحاسبات، والحواسيب.

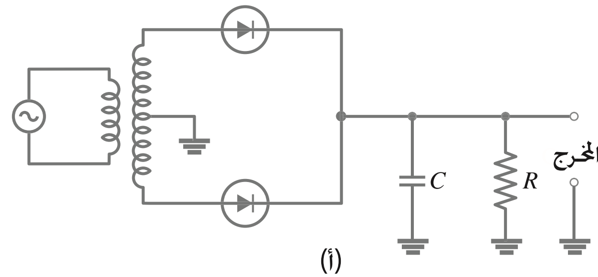


(أ)

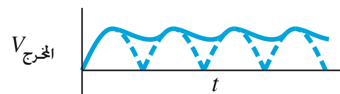


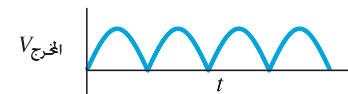
(ب)

الشكل 29 – 29 (أ) دارة موحد (مقوّم) نصف موجة بسيط باستخدام صمام ثنائي شبه موصل. (ب) مصدر ac فولتية مدخلة، وفولتية مخرجة خلال R كدالة في الزمن.



(أ)





الشّكل 29 – 30 (أ) دارة موحّد (مقوّم) موجة كاملة (ومن ضمنها محوّل (مقوّم) يجعل تغيير الفولتية ممكنا). (ب) الفولتية المخرجة بغياب المكثف C. (جـ) فولتية مخرجة بوجود المكثف في الدارة.

تطبيق الفيزياء
LED

وهناك جهاز مفيد آخر هو **الصّمّام الثّنائيّ باعث الضّوء** (LED)، المبتكر في ستينيّات القرن العشرين (1960s). عندما تكون الوصلة pn منحازة إلى الأمام، يبدأ تيار بالانسياب، وتعبر الإلكترونات من المنطقة n إلى المنطقة p وتتحد مع الثقوب. ويمكن أنّ ينبعث فوتون بطاقة تساوي طاقة حزمة الفجوة Eg تقريبا (انظر الشكلين 29 – 23 جـ و 29 – 26). وغالبا، فإنّ الطاقة، وبالتالي الطول الموجي، الموجودة في المنطقة الحمراء من الطيف المرئي تنتج شاشات LED المعروفة على أجهزة VCRs وقارئات CD، ولوحات التحكم في آلات السيارة، والساعات الرقمية، وهكذا. تستخدم LED الأشعة تحت الحمراء (غير المرئية) في التحكم البعيد في أجهزة التلفاز، و DVDs، والأنظمة الصوتية. وتبعث الأنواع الجديدة من LEDs ألوانا أخرى. وبدأت "المصابيح" المعتمدة على تقنية LED باستبدال أنواع أخرى من الإضاءة في التطبيقات المختلفة مثل الكشافات الضوئية، وإشارات المرور، ومصابيح كوابح السيارة، وإشارات الأبواب الخارجية، وألواح المرساة، وأنوار المسارح، والشّاشات. ومع أنّ مصابيح LED- والمسماة أحيانا بإضاءة الحالة الصلبة - مكلفة، إلا أنّ لها كثيرًا من الإيجابيات؛ فهي تعيش طويلا، وفاعلة، ومتينة. وعلى سبيل المثال، فإنّ إشارات المرور المحتوية على LED تدوم من 5 إلى 10 مرات أطول من المصابيح التقليدية المتوهجة، وتستخدم 20% فقط من الطاقة للضوء النّاتج نفسه. وبالنسبة إلى أضواء كوابح السيارة، فهي تضيء أسرع بمقدار جزء قليل من الثانية، ممّا يتيح مسافة توقف إضافية للسائق تمتد من 5 – 6 أمتار (15 – 20 قدما) عند السرعات المستخدمة على الطّرق السّريعة.

خلايا ضوئية
وصمامات ثنائية ضوئية

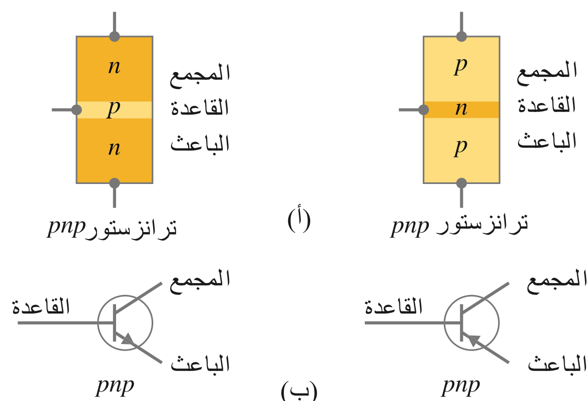
تُعدّ **الخلايا الضوئية والصمامات الثنائية الضوئية** (البند 27 – 3) وصلات من pn تستخدم في الاتجاه المعاكس، تمتص الفوتونات، فتنشأ ثنائيات "إلكترون – ثقب" عندما تكون طاقة الفوتون أكبر من طاقة حزمة الفجوة، E_g. وتنتج الإلكترونات والثقوب المتكونة تيارًا يصبح مصدرًا للقدرة و emf عند وصله بدارة خارجية. وتعمل كاشفات الجسيمات (البند 30 – 13) بطريقة مماثلة. ويسمى الصمام الثنائي جهازا لا خطيّ لعدم تناسب التيار مع الفولتية، أي أنّ منحنى التيار مقابل الفولتية (الشكل 29 – 28) لا يشكل خطّا مستقيما، كما هو للمقاومة (المستقيم نموذجيا). كما أنّ الترانزستورات أجهزة لا خطية أيضا.

* 9-29 الترانزستورات والدّارات المتكاملة

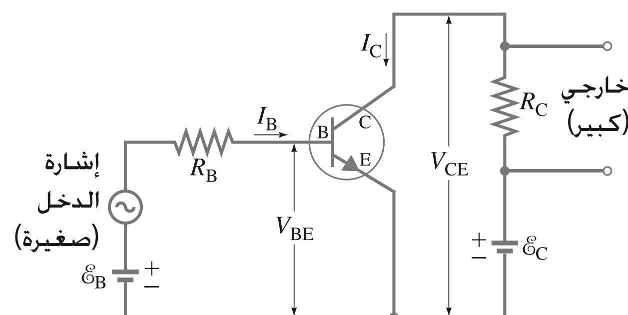
ترانزستورات

تتكوّن وصلة الترانزستور البسيطة من بلورة من نوع واحد من شبه موصل مطعم موضوعة بين بلورتين من النوع الآخر. وتمّت صناعة كلا الترانزستورين npn و pnp، وهما مبينان بالرسم التوضيحي في (الشكل 29 – 31 أ). لقد أعطيت أشباه الموصلات الثلاثة الأسماء الآتية: *المجمع*، و*القاعدة*، و*الباعث*. وتُبيّنُ رموز الترانزستورات npn و pnp في (الشكل 29 – 31 ب). ويوضع السهم دائما على الباعث ليدُلّ على اتجاه (التقليدي) انسياب التيار في العمليات الطبيعية.

ويمكن تحليل عمل الترانزستور نوعيّا – باختصار شديد – كالتالي: افرض أنّ npn ترانزستور موصل كما هو مبين في (الشكل 29 – 32). وأُبْقِيَ على فرق جهد V_{CE} بين المجمع والباعث بواسطة بطارية $\mathscr{E}_C$. تدعى الفولتية المسلطة على القاعدة الفولتية القاعدة المنحازة، V_{BE}. وعندما تكون V_{BE} موجبة، تنجذب إلكترونات التوصيل في الباعث إلى القاعدة. وبما أنّ منطقة القاعدة رفيعة جدّا (ربما $1\,\mu m$)، فإنّ معظم هذه الإلكترونات تنساب خلال القاعدة إلى داخل المجمع، والذي أبقِيَ عند فولتية موجبة. وينساب تيار كبير I_C بين المجمع والباعث، وتيار أصغر من ذلك بكثير I_B خلال القاعدة.



الشكل 29 – 31 (أ) رسم توضيحي لترانزستورات *npn* و *pnp*. (ب) الرموز للترانزستورات *npn* و *pnp*.



الشكل 29 – 32 ترانزستور *npn* استخدم كمكبر.

وتغيرات صغيرة في فولتية القاعدة ناجّة من إشارة مدخلة تسبب تغيّراً كبيراً في تيار الجمع. مما يسبِّبُ تغيّرًا كبيرًا أيضًا في انخفاض فرق الجهد خلال المقاومة الناجّة R_C. لذا، فإنّ الترانزستور يستطيع أن يكبّر إشارة صغيرة إلى أخرى كبيرة.

مضخمات

تُعدّ الترانزستورات عناصر رئيسة في **المكبرات** الإلكترونية الحديثة بجميع أنواعها. وفي **الدّارات الرّقمية**، حيث إنّ "وصل" و "قطع" (أو "صفر" و "واحد") هي أساسية، فإنّ الترانزستورات تستطيع أن تعمل كمفتاح أو "بوابة"؛ أي أنّها تسمح للتيار بالمرور ("وصل") أو تمنعه ("قطع"). ويعمل pnp ترانزستور كعمل npn . إلا أنّ الثقوب هي التي تتحرك في الأول بدلا من الإلكترونات. كما أنّ فرق جهد الجمع سالب، وكذلك الحال بالنسبة إلى جهد القاعدة في التشغيل الطبيعي.
شكلت الترانزستورات تقدمًا هائلًا في تصغير الدارات الإلكترونية. وبالرغم من أنّ الترانزستورات بنوعيها صغيرة جدًّا مقارنةً مع أنابيب التفريغ التي كانت تستخدم سابقًا، إلا أنّها تُعدّ رائعةً مقارنةً مع **الدّارات التّكامليّة** أو **الشّرائح** (انظر الصورة عند بداية هذا الفصل). يمكن وضع كميّاتٍ ضئيلة من الشوائب عند مواضع معيّنة داخل بلّورة سيلكون نقية. ويمكن أن ترتب هذه البلورات لتشكيل صمّامات ثنائيّة، وترانزستورات، ومقاومات (أشباه موصلات غير مطعمة). ويمكن أيضًا تشكيل مواسعات ومحاثّات، بالرغم من أنّه يتمّ توصيلها منفردة. إنّ شريحة ضئيلة لا يتجاوز طول جانبها عدة ميليمترات، يمكن أن تحتوي على الملايين من الترانزستورات وعناصر الدارة الأخرى. وتُعدّ الدارات التكاملية قلب الحواسيب، وأجهزة التلفاز، والحاسبات، وآلات التصوير، والآلات الإلكترونية التي تتحكم بالطائرة، ومركبات الفضاء، والسيارات. إنّ "التصغير" المنتج بواسطة الدارات التكاملية لن يسمح للدارات المعقدة بدرجةٍ هائلةٍ أن توضع في حيّزٍ صغيرٍ فقط، بل سمح كذلك بازدياد هائل في سرعة العمليات أيضًا، ولنقل، في الحواسيب، بسبب المسافات الضئيلة جدًّا التي تقطعها الإشارات الإلكترونية.

الدارات الرقمية والبوابات

* ملخص

تفسّر الميكانيكا الكمية ترابط الذرات مع بعضها لتتشكل **الجزيئات**.
وفي **الرابطة التساهمية**، تتداخل السّحب الإلكترونية لذرتين أو أكثر بسبب التداخل البناء بين الموجات الإلكترونية. وتنجذب الأنوية الموجبة إلى هذا التركيز من الشحنات السالبة بينها، لتتشكل الرابطة.
أمّا **الرابطة الأيونية** فتعدّ حالة متطرفة من الرابطة التساهمية التي يقضي خلالها إلكترون أو أكثر من ذرة ما وقتًا أكثر بكثير حول ذرة أخرى مقارنة بذرته. وبناء على هذا، تتصرف الذرات في حينها كأيونات مشحونة بشحنتين متعاكستين يجذب كلّ منهما الآخر، ليشكلا الرابطة.
إنّ **الروابط القوية** تمسك الجزيئات مع بعضها، كما أنها تمسك الذرات والجزيئات معا في المواد الصلبة. و**الروابط الضعيفة (روابط فان دير فالز)**، مهمة كذلك، وتربط الجزيئات بعضها ببعض.
وعندما تتحد الذرات مع بعضها لتتشكل الجزيئات، فإنّ مستويات الطاقة للإلكترونات الخارجية تتغير لأنها تتفاعل مع بعضها بعضا. وتصبح مستويات طاقة أخرى ممكنة بسبب قابلية الذرات للاهتزاز بالنسبة إلى بعضها، ولاستطاعة الجزيء ككل على الدوران أيضا. إنّ مستويات الطاقة للحركتين الاهتزازية والدورانية مكماة، وهي قريبة جدّا من بعضها (عادة، تبعد عن بعضها 10^{-3} eV إلى 10^{-1} eV). وبسبب ذلك، يصبح كلّ مستوى طاقة ذري مجموعة من المستويات القريبة من بعضها بسبب الحركات الاهتزازية والدورانية. و تبدو الانتقالات من مستوى إلى آخر كخطوط كثيرة قريبة جدّا من بعضها. وتدعى الأطياف الناجّة **الأطيافَ الحزميّة**.
وتعطى مستويات الطاقة الدورانية المكماة كالتالي:

$$E_{rot} = L(L+1)\frac{\hbar^2}{2I}, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(1 – 29)}$$

حيث I هو عزم القصور (أو الاستمرارية) الذاتي للجزيء.

وتعطى مستويات الطاقة للحركة الاهتزازية كالتالي:

$$E_{vib} = (\nu + \tfrac{1}{2})hf, \qquad \nu = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(3-29)}$$

حيث تمثل f التردد الطبيعي التقليدي لاهتزاز الجزيء. وتخضع الانتقالات بين مستويات الطاقة لقواعد الانتقاء $\Delta L = \pm 1$، و $\Delta\nu = \pm 1$.
إنّ بعض **المواد الصلبة** مرتبطة ببعضها بروابط تساهمية وأيونية، كالجزيئات تمامًا. أمّا في الفلزّات، فإنّ القوة الكهربائية الساكنة بين الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة تساعد على تشكّل **الرابطة الفلزّيّة**.
وفي المواد الصلبة البلورية، تترتب حالات الطاقة الممكنة في حُزَم، وتكون المستويات في كلّ حزمة قريبة من بعضها. ولكن، قد تكون هناك فجوات طاقة ممنوعة بين الحزم. تتميز الموصلات الجيدة بأنّ أعلى حزمة مأهولة (**حزمة التوصيل**) تكون مملوءة جزئيّا. ولذلك، هناك حالات كثيرة يمكن الوصول إليها ستكون متوافرة للإلكترونات لتتحرك بينها، وتتسارع عند تسليط فرق جهد. وفي **العوازل الجيدة**، تكون أعلى حزمة طاقة مأهولة (**حزمة التكافؤ**) مملوءة تماما . وتكون هناك طاقة فجوة كبيرة (5 eV إلى 10 eV) تفصلها عن الحزمة الأعلى التالية، **حزمة التوصيل**.وعند درجة حرارة الغرفة، تكون الطاقة الحركية الجزيئية (الطاقة الحرارية) المتوافرة نتيجة التصادمات حوالي 0.04 eV فقط. وبسبب ذلك، لن يستطيع أيّ إلكترون (تقريبا) القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. وفي شبه الموصل، تكون الفجوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل أصغر من ذلك بكثير، وهي بمستوى 1 eV. وعليه، فإنّ عدة إلكترونات فقط يمكنها الانتقال من حزمة التكافؤ المملوءة الرئيسة إلى حزمة التوصيل القريبة الفارغة تقريبا.
وفي شبه **الموصل المطعم**، تحلّ نسبة صغيرة من الذرات الشوائب ذات خمسة أو ثلاثة إلكترونات محلّ عدة ذرات سيلكون طبيعية مع إلكترونات تكافؤها الأربعة. وتنتج الشائبة ذات الإلكترونات الخمسة شبه موصل من نوع n لتكون الإلكترونات السالبة حاملات للتيار. وتنتج الشائبة ذات

الإلكترونات الثلاثة شبه موصل من **نوع p** لتكون **الثقوب** الموجبة فيه حاملات التيار. إنّ مستوى الطاقة للذرات الشائبة يركد قليلا أسفل حزمة التوصيل في شبه الموصل نوع n، ويعمل **كمانح** تنتقل منه الإلكترونات بسهولة إلى حزمة التوصيل. أما مستوى طاقة الذرات الشائبة في شبه موصل نوع p فيركد أعلى حزمة التكافؤ بقليل، ويعمل كمستوى **متقبّل**؛ لأنّ الإلكترونات من حزمة التكافؤ تستطيع الوصول إليه بسهولة، تاركة ثقوبًا خلفها حاملات للشحنة .

ويتكون **الصمّام الثنائي** شبه الموصل من **وصلة p**، ويسمح للتيار بالانسياب في اتجاه واحد فقط. ويمكن استخدامه كموحّد (مقوّم) لتغيير ac إلى dc.

تتكون الترانزستورات المألوفة من ثلاثة مقاطع شبه موصلة؛ إمّا ***pnp*** أو ***npn***. وتستطيع الترانزستورات تكبير الإشارات الكهربائية، كما أنّ لها استخدامات أخرى عديدة. وتتكون الدارة التكاملية من بلورة شبه موصلة ضئيلة جدًّا، أو شريحة. وقد بني الكثير من الترانزستورات والصمّامات الثنائية والمقاومات وعناصر دارة أخرى عليها عن طريق تطعيمها بالشوائب، وبمنتهى الدّقة والحرص.

أسئلة

***1.** ما نوع الرابطة التي تتوقعها لـ : (أ) جزيء N_2 ؟ (ب) جزيء HCl؟ (جـ) ذرات F في مادة صلبة ما؟

***2.** صِفْ كيفية تشكّل الجزيء $CaCl_2$.

***3.** هل يمتلك أيّ من الجزيئات H_2 ، أو O_2، أو H_2O عزمًا ثناقطبيًّا دائمًا؟ فسّر.

***4.** بالرغم من أنّ الجزيء H_3 غير متزن، فإنّ $H_3{}^+$ متزن. فسّر مستخدمًا مبدأ باولي للاستبعاد.

***5.** ما أصناف طاقة الجزيء الأربع؟

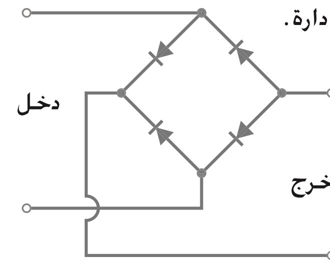
***6.** هل تتوقع أن يكون الجزيء $H_2{}^+$ متزنا؟ وإذا كان كذلك، أين يمكن للإلكترون الوحيد أن يقضي معظم وقته؟

***7.** فسّر لماذا تشكّل ذرة الكربون $(Z = 6)$ عادة أربع روابط مثل ذرات الهيدروجين.

***8.** إذا كانت إلكترونات التوصيل حرة الحركة في الفلز، فلِمَ لا تترك الفلزّ كليّا؟

***9.** فسّر لماذا تزداد مقاومة الفلزات مع درجة الحرارة، في حين أنّ مقاومة أشباه الموصلات ربما تقلّ مع ازدياد درجة الحرارة.

***10.** يبين (الشكل 29 – 33) موحد (مقوّم) موجه كاملة " نوع – جسر". فسّر كيف يوحّد اتجاه سريان التيار؟ وكيف ينساب التيار خلال كلّ نصف دارة.



الشّكل 29 – 33
(السّؤال 10)

***11.** قارن بين مقاومة وصلة صمام ثنائي pn موصول بطريقة الانحياز الأمامي من جهة، ومقاومته عندما يتمّ توصيله بالانحياز الخلفي.

***12.** فسّر كيف يمكن استخدام الترانزستور كمفتاح.

***13.** ما الفرق الرئيس في أشباه الموصلات من نوعي n و p؟

***14.** صِفْ كيف يمكن أن يعمل ترانزستور pnp كمكبّر.

***15.** في الترانزستور، يمكن اعتبار وصلة القاعدة – الباعث ووصلة القاعدة – المجمع صمامين ثنائيين أساسيين. فهل هاتان الوصلتان منحازتان إلى الأمام أم إلى الخلف في التطبيق المبين في (الشكل 29 – 32)؟

***16.** يمكن لترانزستور أن يكبر الإشارة الإلكترونية، أي زيادة قدرة الإشارة المدخلة . من أين يأتي بالطاقة لزيادة القدرة؟

***17.** طعّم شبه موصل من السيلكون بواسطة الفوسفور. فهل تُعدّ هذه الذرات مانحة أم متقبلة؟ ما النوع الذي سيصبح عليه شبه الموصل هذا؟

***18.** هل تتبع الصمّامات الثنائية والترانزستورات قانون أوم؟ فسّر.

***19.** هل يمكن استخدام الصمام الثنائي لتكبير إشارة ؟ فسّر.

مسائل

29 - 1 إلى 29 – 3 الروابط الجزيئية*

***1.** (I) قدّر طاقة ربط الجزيء KCl عن طريق حساب طاقة الوضع الكهربائية الساكنة إذا كانت المسافة الفاصلة بين الأيونين K^+ و Cl^- في حالته المستقرة 0.28 nm. افرض مقدار شحنة كلّ منهما $1.0e$.

***2.** (II) طاقة الربط المقيسة لـ KCl تساوي 4.43 eV. ومن نتيجة مسألة 1، قدّر المساهمة لطاقة الربط من السّحب الإلكترونية الطاردة عند مسافة الاتزان $r_0 = 0.28$ nm.

***3.** (II) قدّر طاقة الربط لجزيء H_2، مفترضًا أنّ نواتي الهيدروجين H تفصلهما مسافة 0.074 nm وأنّ الإلكترونين يقضيان 33% من وقتهما في منتصف المسافة بينهما.

***4.** (II) غالبًا، تقاس طاقات الربط عمليًّا بدلالة كيلو سعر/مول، وبعد ذلك تحسب طاقة الربط بدلالة eV/ مول من هذه النتيجة. ما معامل التحويل من كيلو سعر/مول إلى eV/ مول؟ وما طاقة ربط KCl (= 4.43 eV) بدلالة كيلو سعر/مول؟

***5.** (III) (أ) طبّق منطقًا مشابهًا لما جاء في النّصّ للحالتين $S = 0$ و $S = 1$ عند تشكيل جزيء H_2 لتثبت سبب عدم تشكّل جزيء He_2. (ب) فسّر سبب تمكّن الجزيء الأيوني $He_2{}^+$ من التشكّل. (تظهر التجربة أنّ له طاقة ربط مقدارها 3.1 eV عند $r_0 = 0.11$ nm).

29 – 4 أطياف جزيئية *

***6.** (I) أثبت أنّ للكمية $\hbar^2/I$ وحدات طاقة.

***7.** (II) ما يُسَمّى "الطاقة الدورانية المميزة" $\hbar^2/2I$، لـ N_2، هي 2.48×10^{-4} eV. احسب طول رابطة N^2.

***8.** (II) (أ) احسب الطاقة الدورانية المميزة، $\hbar^2/2I$، لجزيء O_2 طول رابطته 0.121 nm. (ب) ما طاقات وأطوال أمواج الفوتونات المنبعثة من الانتقال $L = 2$ إلى $L = 1$؟

***9.** (II) إذا كانت مسافة الاتزان الفاصلة بين ذرتي H في جزيء H_2 هي 0.074 nm (الشكل 29 – 8). فاحسب طاقات وأطوال أمواج الفوتونات للانتقالات الدورانية (أ) $L = 1$ إلى $L = 0$. (ب) $L = 2$ إلى $L = 1$. (جـ) $L = 3$ إلى $L = 2$.

*10. (II) احسب طول رابطة الجزيء NaCl إذا علمت أنّ ثلاثة أطوال أمواج متتالية لانتقالات دورانية هي كالتالي: 23.1 mm، 11.6 mm و 7.71 mm.

*11. (III) (أ) استخدم المنحنى في (الشكل 29 – 17) لتقدر ثابت الصلابة k لجزيء H_2. (تذكر أنّ $PE = \frac{1}{2}kx^2$). (ب) قدّر الطول الموجي الطبيعي للانتقالات الاهتزازية باستخدام الصيغة التقليدية (الفصل 11)، باستعمال $\frac{1}{2}$ كتلة ذرة هيدروجين فقط (لأنّ ذرتي H تتحركان).

* 29 – 5 الرّوابط في المواد الصّلبة

*12. (II) المسافة الفاصلة بين "الجارين" أيوني Na و Cl في بلورة NaCl تعادل 0.24 nm. ما المسافة الفاصلة بين أقرب جارين لأيونات الصوديوم؟

*13. (II) للملح الشائع، NaCl، كثافة مقدارها $2.165\ g/cm^3$، ووزن جزيئي 58.44. قدّر المسافة بين أقرب جارين (أيوني Na و Cl). [مساعدة: يمكن اعتبار كلّ أيون "كمكعّب" واحد أو "خليّة" واحدة طول ضلعها s (المجهول) يمتد نحو الخارج من عنده .

*14. (II) أعد حلّ المسألة 13 لـ KCl ذي الكثافة $1.99\ g/cm^3$.

* 29 – 6 نظرية الحزم للمواد الصّلبة

*15. (I) بناء على حزم الطاقة، فسّر سبب كون بلورة كلوريد الصوديوم عازلا جيدًا. [مساعدة : افترض قشور الأيونين Na^+ و Cl^-].

*16. (I) شبه موصل يُقَصَفُ بضوء يتزايد تردده ببطء، فيبدأ بالتوصيل عندما يصل طول موجة الضوء إلى 640 nm. قدّر طاقة الفجوة E_g.

*17. (II) احسب أطول موجة لفوتون يستطيع أن يرغم إلكترونًا في السيلكون ($E_g = 1.4\ eV$) على القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل.

*18. (II) تعادل طاقة الفجوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل في الجرمانيوم 0.72 eV. ما مدى أطوال الأمواج التي يمكن أن يمتلكها فوتون لإثارة إلكترون من قمة حزمة التكافؤ إلى داخل حزمة التوصيل؟

*19. (II) طاقة الفجوة E_g في الجرمانيوم تعادل 0.72 eV. عند استخدامه مكاشف فوتوني. تقريبا، ما عدد الإلكترونات التي يمكن إرغامها على القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل الناجم عن تمرير فوتون طاقته 760-keV على أن يفقد طاقته كلّها بهذه الطريقة؟

*20. (III) لقد رأينا أنّ هناك $2N$ حالات إلكترونية ممكنة في حزمة $3s$ في الصوديوم Na، في حين N هو العدد الكلي للذرات. كم عدد حالات الإلكترون الممكنة في: (أ) حزمة $2s$؟ (ب) حزمة $2p$؟ (جـ) حزمة $3p$؟ واذكر صيغة عامة للعدد الكلي للحالات الممكنة في أيّ حزمة إلكترونية معطاة.

*29 – 7 أشباه الموصلات والتطعيم

*21. (III) افرض أنّ شبه موصل من السيلكون قد طعِّمَ بفسفور بحيث تحُلُّ ذرّةُ فوسفور محلَّ ذرة سيلكون واحدة من 10^6 افرض أنّ الإلكترون "الإضافي" من كلّ ذرة فوسفور قد تمّ التبرع به لحزمة التوصيل. ما معامل ازدياد كثافة إلكترونات التوصيل؟ كثافة السيلكون $2330\ kg/m^3$، وكثافة إلكترونات التوصيل في السيلكون النقي $10^{16}\ m^{-3}$ عند درجة حرارة الغرفة.

*29 – 8 الصّمّامات الثّنائيّة

*22. (I) عند أي طول موجيّ سيشعّ LED إذا كانت طاقة فجوتها $E_g = 1.4\ eV$؟

*23. (I) إذ بعث LED ضوءًا طوله الموجي $\lambda = 650\ nm$، فما طاقة الفجوة (بدلالة eV) بين حزمتي التكافؤ والتوصيل؟

*24. (II) صمام ثنائي من السيلكون، ميزته (العلاقة) للتيار والفولتية مبينة في (الشكل 29 – 28). وصل على التوالي مع بطارية ومقاومة 960-Ω. ما فرق جهد البطارية الضروري لإنتاج تيار مقداره 12-mA؟

*25. (II) افرض أنّ الصمام الثنائي في (الشكل 29 – 28) وصل على التوالي مع 100-Ω مقاومة و 2.0-V بطارية. ما التيار المنساب في هذه الدارة؟ [مساعدة : ارسم خطًّا على (الشكل 29 – 28) يمثل التيار المار في المقاومة كدالة في الفولتية خلال الصمام الثنائي. تقاطع هذا الخط مع المنحنى المميز سيعطي الحل].

*26. (II) ارسم المقاومة كدالة في التيار عند $V > 0$، للصمام الثنائي المبين في (الشكل 29 – 28).

*27. (II) فرق جهد متردد ac مقداره 120 V rms يجب أن يوحّد (يقوّم). قدّر بالتقريب التيار المتوسط في مقاومة الناتج R (25 kΩ) لـ : (أ) موحّد نصف موجة (الشكل 29 – 29). (ب) موحّد موجة كاملة (الشكل 29 – 30) بلا مواسع.

*28. (III) يسمح صمام ثنائي من السيلكون بمرور تيار كبير فقط إذا زاد فرق جهد الانحياز الأمامي عن 0.6 V. قدّر – على نحو تقريبي- التيار المتوسط في مقاومة الناتج R لـ: (أ) موحد (مقوّم) نصف موجة (شكل 29 – 29). (ب) موحد موجة كاملة (الشكل 29 – 29). (ج) موحّد موجة كاملة (الشكل 29 – 30) بلا مواسع. افرض أنّ $R = 150\ \Omega$ في كلّ حالة، وأنّ فرق الجهد المتردد ac هو 12.0V rms في كلّ حالة.

*29. (III) فرق جهد مقداره 120-V rms عند 60-Hz يجب أن يوحد (يقوّم) باستخدام موحد (مقوّم) موجة كاملة (الشكل 29 – 30)، حيث $R = 21\ k\Omega$ و $C = 25\ \mu F$. (أ) قدر بالتقريب التيار المتوسط. (ب) ماذا يحدث إذا كانت $C = 0.10\ \mu F$؟ [مساعدة: انظر البند 19 – 6].

*29 – 9 ترانزستورات

*30. (II) في (الشكل 29 – 32). اكتب معادلة للعلاقة بين تيار كلّ من: القاعدة (I_B)، و المجمع (I_C)، و الباعث (I_E)، غير معلّم في الشّكل).

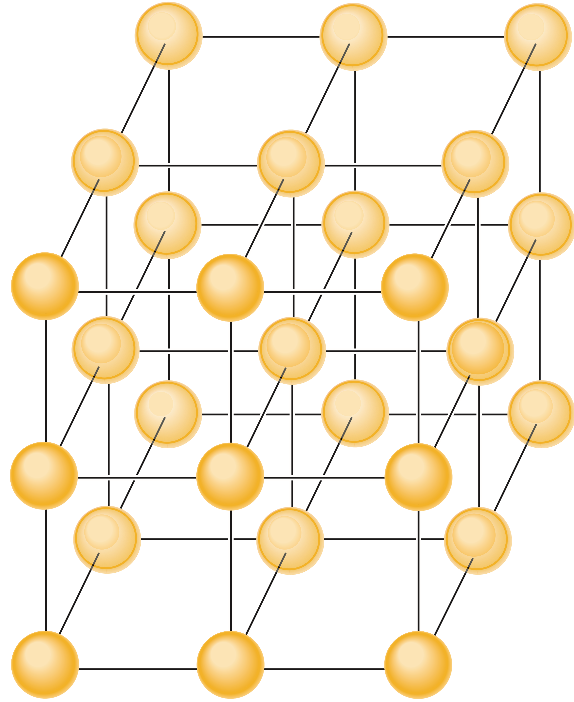
مسائل عامة

*31. قدِّر طاقة الربط لجزيء H_2 عن طريق حساب الفرق في طاقة حركة الإلكترونات بين الحالتين عندما تكون في ذرات منفصلة، وعندما توجد داخل الجزيء، باستخدام مبدأ عدم اليقين. خذ بالحسبان Δx للإلكترونات في الذرات المنفصلة ليكون نصف قطر فلك بور الأول، 0.053 nm، وخذ Δx للجزيء افترض المسافة الفاصلة بين النواتين، 0.074 nm. [مساعدة: افرض $p \approx \Delta p_x$].

*32. متوسط الطاقة الحركية الانتقالية لذرة أو جزيء هو حوالي $\overline{KE} = \frac{3}{2}kT$ (المعادلة 13 – 8)، و $k = 1.38 \times 10^{-23}\ J/K$ وهو ثابت بولتزمان. عند أيّ درجة حرارة T ستكون $\overline{KE}$ بمقدار طاقة الرابطة (وبسبب ذلك يمكن أن تنكسر الرابطة نتيجة للحركة الحرارية) (أ) رابطة تساهمية طاقة ربطها 4.5 eV (لنقل H_2). (ب) رابطة هيدروجينية "ضعيفة" طاقة ربطها 0.15 eV؟

*33. في الملح الأيوني KF، المسافة الفاصلة بين الأيونات 0.27 nm تقريبا. (أ) قدّر طاقة الوضع الكهربائية الساكنة (الكهروسكونية) بين الأيونات على افتراض أنها شحنات نقطية (قيمتها $1e$). (ب) من المعلوم أنّ F تطلق 4.07 eVمن الطاقة عندما "تمسك" إلكترونا، و 4.34 eVضرورية لتأيين K. أوجد طاقة ربط KF نسبة إلى ذرات K و F الحرة مع إهمال طاقة التنافر.

*34. افترض مادة صلبة أحادية الذرة ذات شبكة بلورية ضعيفة الارتباط، حيث كلّ ذرة مرتبطة بستة من جيرانها، وطاقة كلّ رابطة 3.9×10^{-3} eV. عندما تنصهر هذه المادة الصلبة، تذهب حرارة الانصهار الكامنة مباشرة إلى كسر الروابط بين الذرات. قدّر قيمة حرارة الانصهار الكامنة لهذه المادة الصلبة بوحدة J/kg. [مساعدة : أثبت أنّ عدد الروابط في الشبكة المكعبة البسيطة (الشكل 29 – 34) يعادل ثلاثة أضعاف عدد الذرات إذا كان عدد الذرات كبيرًا].



(الشكل 29 – 34) (المسألة 34).

*35. ما عزم القصور (أو الاستمرارية) الذاتي حول مركز الثقل لجزيء O_2 إذا كان طول رابطته 0.121 nm؟

*36. وُجِدَ أنّ طاقة التنشيط لجزيء ثنائي الذرة تساوي 1.4 eV، وعند تفكك الجزيء أطلقت طاقة مقدارها 1.6 eV. ارسم منحنى طاقة كامنة لهذا الجزيء.

*37. عند سقوط أشعة EM على الماس، وُجِدَ أنّ ضوءًا طوله الموجي أقصر من 226 nm يجعل الماس موصلا. ما طاقة الفجوة بين حزمتي التكافؤ و التوصيل للماس؟

*38. يبعث جهاز التحكم البعيد في جهاز التلفاز ضوء IR. إذا كان للمكاشف على جهاز التلفاز ألّا يتجاوب مع الضوء المرئي، فهل يمكن أن يستخدم السيلكون "كنافذة" حيث طاقة فجوته $E_g = 1.14$ eV؟ ما أقصر طول موجة ضوء يستطيع أن يصطدم بالسيلكون دون أن تسبّب في قفز الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل؟

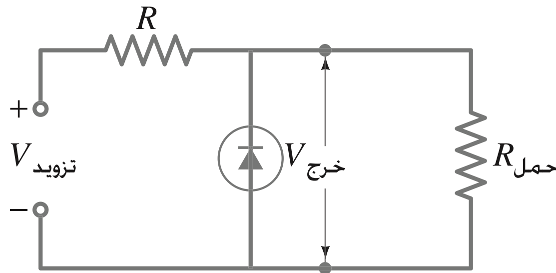
*39. لذرَّة زرنيخ مانحة في شبه الموصل السيلكون المطعّم، افرض أنّ الإلكترون "الإضافي" يتحرك في فلك بور حول أيون الزرنيخ. ولهذا الإلكترون في الحالة الأرضية، خذ بالحسبان ثابت العازل $K = 12$ لشبكة السيلكون (تمثل الضعف في قوة كولوم الناجم عن الذرات أو الأيونات الأخرى في الشبكة) وقدّر: (أ) طاقة الربط. (ب) نصف قطر فلك هذا الإلكترون الإضافي. [مساعدة: عوض عن $\epsilon = K\epsilon_0$ في قانون كولوم، انظر البند 17 – 8].

*40. معظم إشعاعات الشمس تمتلك أطوال أمواج أقصر من 1000 nm. ولكي تمتص خلية شمسية ، ما طاقة الفجوة التي يجب أن تمتلكها هذه المادة؟

*41. لشبه موصل معين، أطول طول موجة إشعاعات يمكن امتصاصها تعادل 1.92 mm. فما طاقة الفجوة في شبه الموصل هذا؟

*42. أصبح LED الأخضر والأزرق متوافرًا بعد سنوات عديدة من تطوير أوّل LED أحمر. ما طاقة الفجوات التي تتوقع إيجادها لـِ LEDs أخضر (525 nm) و LEDs أزرق (465 nm) تقريبًا؟

*43. منظم فولتية صمام زنر الثنائي مبين في (الشكل 29 – 35). افرض أنّ $R = 1.80$ kΩ، وأنّ الصمام الثنائي سينهار عند الجهد العكسي 130 V (يزداد التيار باضطراد عند تلك النقطة، كما هو مبين أقصى يسار (الشكل 29 – 28) عند فرق جهد مقداره – 12 V على ذلك الرسم التخطيطي). صُنّف الصمّام الثنائي عند أقصى تيار 120 mA. (أ) إذا كان الحمل $R_{load} = 15.0$ kΩ، ما مدى فرق الجهد المزود الذي ستحافظ عنده الدارة على فولتية ناجّة مقدارها 130 V؟ (ب) إذا كان فرق الجهد المزود 200 V، ما مدى مقاومة الحمل الذي سينظم عنده فرق الجهد؟



الشكل 29 – 35 (المسألة 43).

إجابات التمارين

أ: 1.30 mm ، 0.87 mm ، 0.85 mm .

ب: 0.81 eV.



تقوم عالمة الآثار في هذه الصورة بإزالة بقايا سلحفاة بحرية من داخل تجويف حجري صنعه الإنسان القديم. إنّ تحديد عمر هذه البقايا بواسطة الكربون يمكن أن يخبرنا عن الزمن الذي سكن فيه الإنسان هذا الموقع.
في هذا الفصل، سنبدأ دراستنا للفيزياء النووية بما في ذلك خصائص الأنوية، والأشكال المختلفة للنشاط الإشعاعي، وكيفية استخدام التحلل الإشعاعيّ في مجالات مختلفة لتحديد عمر الأجسام القديمة؛ من العظام، والأشجار إلى الصخور ومواد معدنية أخرى، والحصول على معلومات عن تاريخ الأرض.

الفصل 30

الفيزياء النوويَّة و النّشاط الإشعاعي

في القرن العشرين، أدّت تجربة رذرفورد إلى فكرة أنّ مركز الذرّة تشغله نواة صغيرة وثقيلة. وفي الوقت نفسه الذي كانت تتطوّر فيه النظرية الكمية، وبحاول العلماء فهم تركيب الذرة وإلكتروناتها، كان البحث في النواة نفسها قد بدأ أيضًا. وفي هذا الفصل والذي يليه، سنقدّم لمحة مختصرة عن الفيزياء النووية.

1-30 تركيب الذرة وخصائصها

لقد كان السؤال المهم للعلماء هو: هل النواة مركبة؟ وما هو تركيبها؟ لقد تبين أنّ النواة كينونة معقدة ولم تفهم بشكل كامل حتى وقتنا الحاضر. على أيّ حال، في بدايات 1930 طور نموذج للنواة ومازال مفيدًا. واستنادًا إلى هذا النموذج، فإنّ النواة مكونة من نوعين من الجُسيمات هما: البروتونات والنيوترونات. (هذه الجُسيمات لها أيضًا خصائص موجية، ولكن لتبسيط تخيلها نشير إليها ببساطة كـ" جُسيمات").

البروتون

البروتون هو نواة أبسط ذرة، الهيدروجين. شحنته موجبة ($= +e = +1.60 \times 10^{-19}$ C) وهو المقدار نفسه للإلكترون) وكتلته.

$$m_p = 1.67262 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

النيوترون

أما النيوترون، الذي تأكد وجوده في عام 1932 عن طريق الفيزيائي الإنجليزي جيمس شادويك (1891-1974)، فهو متعادل كهربائيًا ($q = 0$) كما يتضح من اسمه، وكتلته أكبر قليلًا من تلك التي للبروتون:

$$m_n = 1.67493 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

نيوكلونات

هذان الجُسيمان يشكلان النواة، ويشار إليهما بشكل مجتمع **بالنيوكلونات**.

A و Z

وعلى الرغم من أنّ نواة الهيدروجين تحتوي على بروتون واحد، إلا أنّ أنوية العناصر الأخرى جميعها تحتوي على النيوترونات والبروتونات. يشار إلى الأنوية المختلفة عادة بـ**"نيوكليدات"**. يُسَمّى عددُ البروتونات في نواة معينة (نيوكليد) العددَ الذريَّ، ويرمز إليه بالحرف Z. أما العدد الكتلي للنيوكلونات- النيوترونات زائد البروتونات- فيرمز إليه بالحرف A، ويُسَمّى **العدد الكتلي** الذري، ويُسَمّى أحيانًا ببساطة **العددَ الكتلي**. يستخدم هذا الاسم لأنّ كتلة النواة قريبة جدًّا من حاصل ضرب A في كتلة نيوكلون واحد. وهكذا، فإنّ النواة التي تحتوي على 7 بروتونات و 8 نيوترونات يكون لها $Z = 7$، و $A = 15$. أما **عدد النيوترونات** N فهو $N = A - Z$.

ولتحديد نواة ما؛ نحتاج إلى إعطاء كلّ من A، و Z فقط. وهناك رمز خاص يستعمل بشكل شائع ويأخذ الشكل التالي:

$$^{A}_{Z}\text{X},$$

حيث X الرمز الكيميائي للعنصر (انظر الملحق B والجدول الدوري الذي على الجزء الداخلي للغطاء الخلفي للكتاب). أمّا A فهو العدد الكتلي الذري، في حين يشير Z إلى العدد الذري. على سبيل المثال، $^{15}_{7}\text{N}$ يعني نواة النتيروجين التي تحتوي على 7 بروتونات، و8 نيوترونات وهو ما مجموعه 15 نيوكلونا.

في الذرة المتعادلة، عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة يساوي العدد الذري Z (لأنّ الشحنة التي على الإلكترون لها مقدار الشحنة نفسه التي على البروتون ولكن تعاكسها في الإشارة).

تُحَدَّد الخصائص الرئيسة للذرة وكيفية تفاعلها مع الذرات الأخرى بشكل كبير بمعرفة عدد الإلكترونات. لذا، فإنّ Z تحدد أيّ نوع من الذرات: كربونا، أكسجينا، أو أي شيء آخر. إنّ تعيينَ كلّ من رمز النواة وعددها الذري Z كما وصفنا سابقًا نوعٌ من الإسهاب. ولهذا، إذا كانت النواة هي النيتروجين على سبيل المثال، فإننا نعرف مباشرة أنّ $Z = 7$. وعليه، فإنّ الحرف السفلي Z يسقط من الرمز، وبالتالي فإنّ $^{15}_{7}\text{N}$ تكتب ببساطة ^{15}N؛ وبتعبير لفظي نقول، نيتروجين خمسة عشر.

النظائر

لقد وجد أنّ نوعًا محددًا من الذرّات (الكربون، مثلًا) تحتوي أنويته على أعداد مختلفة من النيوترونات، على الرغم من أنّ لها العدد نفسه من البروتونات؛ فعلى سبيل المثال، أنوية الكربون لها دائمًا 6 بروتونات، ولكن قد يكون لها 5، 6، 7، 8، 9، 10 نيوترونات. تُسَمّى الأنوية التي تحتوي على عدد البروتونات، واختلاف أعداد النيوترونات بـ**" النظائر"**. وهكذا، فإنّ $^{11}_{6}\text{C}$, $^{12}_{6}\text{C}$, $^{13}_{6}\text{C}$, $^{14}_{6}\text{C}$, $^{15}_{6}\text{C}$, $^{16}_{6}\text{C}$ وجميعها نظائر للكربون. إنّ النظائر لعنصر ما ليست متوافرة كلها بشكل متساوٍ؛ فعلى سبيل المثال، 98.9% من الكربون الموجود في الطبيعة (على الأرض) هو للنظير $^{12}_{6}\text{C}$، وحوالي 1.1% للنظير $^{13}_{6}\text{C}$. يشار إلى هذه النسب المئوية بـ**"الوفرة الطبيعية"**. هناك العديد من النظائر غير موجودة في الطبيعة، ولكن يمكن إنتاجها في المختبر بواسطة التفاعلات النووية (المزيد عن ذلك سوف يأتي لاحقًا). في الواقع، العناصر التي بعد اليورانيوم ($Z > 92$) جميعها لا توجد في الطبيعة على الأرض بل تنتج صناعيًّا فقط . مثل العديد من النويدات التي عددها الذري $Z \leq 92$.

إنّ الحجم التقريبي للأنوية كان قد حدد في الأصل عن طريق رذرفورد من تشتت جسيمات مشحونة عن شرائح فلزية رقيقة. ولكن لا نستطيع الحديث عن حجم مؤكد للنواة بسبب ازدواجية جُسيم – موجة: وهكذا يجب أن يبقى الحيز المكاني للأنوية غير واضح نوع ما. ومع ذلك، يمكن قياس الحجم التقريبي للنواة عن طريق تشتت إلكترونات عالية السرعة بعيدًا عنها. لقد وجد أنّ الأنوية لها شكل واضح نوع ما. ومع ذلك، يمكن قياس الحجم التقريبي للنواة عن طريق تشتت إلكترونات عالية السرعة بعيدًا عنها. لقد وجد أنّ الأنوية لها شكل كروي يزداد نصف قطره مع زيادة A حسب الصيغة التقريبية التالية:

* إن قيم الكتل الذرية للعناصر الواردة في الجدول الدوري *(الجزء الداخلي من الغطاء الأخير)* هي معدل كتل النظائر الموجوده في الطبيعة.

أنصاف الأقطار النووية

$$r \approx (1.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(A^{\frac{1}{3}}) \quad \textbf{(1-30)}$$

بما أنّ حجم الكرة $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. لذلك نلاحظ أنّ حجم النواة يتناسب تقريبًا مع عدد النيوكلونات. $V \propto A$ وهذا هو الذي يجب أن نتوقعه إذا كانت النيوكلونات مثل كرات بلياردو صلبة: إذا ضاعفت عدد الكرات. يتضاعف الحجم الكلي. وهكذا. فإنّ الأنوية جميعها لها الكثافة نفسها تقريبًا. وهي بالتأكيد كبيرة جدًّا (انظر إلى مثال 30-2).

الاختصار المتري لـِ 10^{-15} m هو الفيرمي (نسبة إلى إنريكوفيرمي) أو الفيمتومتر. fm (الجدول 1-4 أو داخل الغطاء الأمامي للكتاب). لذلك. فإنّ $1.2 \times 10^{-15}\,\text{m} = 1.2\,\text{fm}$ أو 1.2 فيرمي.

المثال 30-1 قدّر **الحجوم النووية**

قدر قطر الأنوية التالية: (أ) $^{1}_{1}\text{H}$ ، (ب) $^{40}_{20}\text{Ca}$ ، (جـ) $^{208}_{82}\text{Pb}$ ، (د) $^{235}_{92}\text{U}$.

النّهج : نصف قطر نواة ما يرتبط مع عدد النيوكلونات A الموجودة فيها وفقًا (للمعادلة 30-1)، القطر $d = 2r$.

الحلّ: (أ) للهيدروجين، $A = 1$، من (المعادلة 30-1) نحصل على

$$d = \text{diameter} = 2r \approx 2(1.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(A^{\frac{1}{3}}) = 2.4 \times 10^{-15}\,\text{m}$$

لأنّ $A^{\frac{1}{3}} = 1^{\frac{1}{3}} = 1$

(ب) للكالسيوم $d = 2r \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(40)^{\frac{1}{3}} = 8.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$

(جـ) للرصاص $d \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(208)^{\frac{1}{3}} = 14 \times 10^{-15}\,\text{m}$

(د) لليورانيوم $d \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(235)^{\frac{1}{3}} = 15 \times 10^{-15}\,\text{m}$

وهكذا تتراوح الأقطار النووية فقط من 2.4 fm إلى 15 fm.

ملحوظة: بما أنّ أنصاف الأقطار النووية تتغير وفقًا لـِ $A^{\frac{1}{3}}$، فإنّ أكبر الأنوية لها نصف قطر أكبر بست مرات فقط من ذلك الذي لأصغر الأنوية.

المثال 30-2 قدّر **الكثافة الذرية والنووية**

قارن كثافة المادة النووية مع كثافة المواد الصلبة الطبيعية.

النّهج: كثافة المواد الصلبة والسائلة الطبيعية في حدود $10^3 - 10^4\,\text{kg/m}^3$، (انظر الجدول 10-1) وبما أنّ الذرات متقاربة

ومكتظة، فإنّ لها الكثافة نفسها تقريبًا. وهكذا، فإننا نقارن كثافة النواة (كتلة / حجم) مع تلك التي لذرتها ككل.

الحلّ: كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون بعامل يساوي

$$\frac{1.7 \times 10^{-27}\,\text{kg}}{9.1 \times 10^{-31}\,\text{kg}} \approx 2 \times 10^3$$

وهكذا، فإنّ أكثر من 99.9% من كتلة الذرة مركزة في النواة. ولتقديرنا؛ يمكن القول إنّ كتلة الذرة تساوي كتلة النواة، أي أنّ $m_{\text{ذرة}} / m_{\text{نواة}} = 1$. يبلغ نصف قطر الذرات تقريبًا 10^{-10} m (الفصل 27)، أمّا الأنوية فيصل إلى 10^{-15} m (المعادلة 30-1)، وبالتالي فإنّ نسبة الكثافة النووية إلى الكثافة الذرية تساوي تقريبًا

$$\frac{\rho_{\text{نووية}}}{\rho_{\text{ذرية}}} = \frac{(m_{\text{نووية}}/V_{\text{نووية}})}{(m_{\text{ذرية}}/V_{\text{ذرية}})} = \left(\frac{m_{\text{نووية}}}{m_{\text{ذرية}}}\right)\frac{\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{ذرية}}}{\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{نووية}}} \approx (1)\frac{(10^{-10})^3}{(10^{-15})^3} = 10^{15}$$

أي أنّ النواة أكثر كثافة من المادة الاعتيادية بحوالي 10^{15}.

تنويه !

عدم اليقين غير ناتج من قصور الأجهزة، ولكنه متأصل في الطبيعة (الموجة – الجسم)

يمكن تحديد كتل الأنوية من نصف قطر انحناء أنوية سريعة تتحرك (مثل أيونات) في مجال مغناطيسي باستعمال مقياس الطيف الكتلي الذي تمت دراسته في (البند 20-11).

وفي الحقيقة، فإنّ وجود نظائر مختلفة للعنصر نفسه (عدد مختلف من النيوترونات) كان قد اكتشف باستعمال هذا الجهاز. يمكن تحديد الكتل النووية في **وحدات كتلة ذرية موحدة** (u). وعلى هذا المقياس، أعطيت ذرة الكربون المتعادلة $^{12}_{6}C$ قيمة دقيقة تساوي 12.000000 u. لذا، فإنّ كتلة النيوترون المقيسة هي 1.008665 u والبروتون 1.007276 u، وذرة الهيدروجين المتعادلة (البروتون + الإلكترون) 1.007825 u. يحتوي الفهرس B على كتل العديد من الأنوية. ويجب ملاحظة أنّ الكتل التي في هذا الجدول، كما هو مألوف، هي للذرة المتعادلة (بما فيها الإلكترونات) وليست للنواة المجردة. تعين الكتل غالبًا باستعمال وحدة طاقة الإلكترون – فولت. ويمكن عمل ذلك لأنّ الكتلة والطاقة مرتبطتان مع بعضهما بعضًا، والعلاقة الدقيقة التي تربط بينهما تُعطى حسب معادلة آينشتاين $E = mc^2$ (الفصل 26). وبما أنّ كتلة البروتون هي 1.67262×10^{-27} kg أو 1.007276 u، فإنّ

$$1.0000\ \text{u} = \left(\frac{1.0000\ \text{u}}{1.007276\ \text{u}}\right)(1.67262 \times 10^{-27}\ \text{kg}) = 1.66054 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

وهذا يكافيء الطاقة (انظر إلى الجدول الذي على الغطاء الأمامي من الداخل). بوحدة MeV $(= 10^6\ \text{eV})$ كما يلي:

$$E = mc^2 = \frac{(1.66054 \times 10^{-27}\ \text{kg})(2.9979 \times 10^8\ \text{m/s})^2}{(1.6022 \times 10^{-19}\ \text{J/eV})} = 931.5\ \text{MeV}$$

وهكذا فإنّ

وحدة الكتلة الذرية و *MeV*

$$1\ \text{u} = 1.6605 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 931.5\ \text{MeV}/c^2.$$

(جدول 30-1)

كتل السكون بالكيلوجرام، وحدات الكتلة الذرية الموحدة و MeV/c^2

جدول 30-1
كتل السكون بالكيلوجرام، وحدات الكتلة الذرية الموحدة و MeV/c^2

الكتلة	الكتلة		
	kg	u	MeV/c^2
إلكترون	9.1094×10^{-31}	0.00054858	0.51100
بروتون	1.67262×10^{-27}	1.007276	938.27
ذرة	1.67353×10^{-27}	1.007825	938.78
نيوترون	1.67493×10^{-27}	1.008665	939.57

إنّ الأنوية ومكوناتها: البروتون والنيوترون، لها مغزلية (برم) $\frac{1}{2}$ وأعداد كمية لكمية التحرك الزاوية كتلك التي للإلكترون. وهذا يعني أنّ البروتون والنيوترون جُسيمات لكلّ منهما مغزلية (برم). كما أنّ النواة، التي تتكون من بروتونات ونيوترونات، لها عدد كمي للمغزلية النووية (برم نووي) I والذي يمكن أن يكون عددًا صحيحًا، أو نصف صحيح اعتمادًا على عدد النيوكلونات المكونة لها، زوجية كانت أم فردية.

2-30 طاقة الترابط والقوى النووية

طاقات الترابط

تكون الكتلة الكلية للنواة المستقرة دائمًا أقلّ من مجموع كتل نيوكلوناتها منفصلة، كما يبين المثال التالي:

المثال 3-30 **كتلة $^{4}_{2}$He مقارنة مع مكوناتها**

قارن كتلة ذرة $^{4}_{2}$He مع الكتلة الكلية للجُسيمات المكونة لها.

حل المسألة.
تتبع كتل الإلكترونات

النّهج: تحتوي نواة $^{4}_{2}$He على بروتونين ونيوترونين. تقدم الجداول عادة كتل الذرات المتعادلة – أي أنّ النواة زائد كتلة Z إلكترون – لأنّ الكتل تقاس هكذا. لذلك يجب التأكد من موازنة الإلكترونات عند مقارنة الكتل. إذن، سنستعمل كتلة $^{1}_{1}$H عوضًا عن كتلة البروتون لوحده. ومن الفهرس B، نجد كتلة ذرة $^{4}_{2}$He (بما فيها كتلة إلكترونين) بالإضافة إلى كتلة النيوترونين وكتلة ذرتي الهيدروجين (= بروتونين + إلكترونين).

الحلّ: إنّ كتلة ذرة $^{4}_{2}$He المتعادلة تساوي 4.002603 u كما وردت في الفهرس B. وكتلة النيوترونين وذرتي الهيدروجين H (بروتونان و إلكترونان) تساوي

$$2m_n = 2(1.008665\ \text{u}) = 2.017330\ \text{u}$$

$$2m(^{1}_{1}\text{H}) = 2(1.007825\ \text{u}) = \underline{2.015650\ \text{u}}$$

$$\text{sum} = 4.032980\ \text{u}$$

وهكذا، فإنّ كتلة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ المقيسة تكون $4.032980\ \mathrm{u} - 4.002603\ \mathrm{u} = 0.030377\ \mathrm{u}$ أقلّ من كتلة مكوناتها. أين ذهب هذا الفرق في الكتلة؟ في الحقيقة، لقد تحوّل هذا الفرق في الكتلة إلى طاقة من نوع آخر (مثل إشعاعية أو طاقة حركية على سبيل المثال). الفرق في الكتلة (أو الطاقة) في حالة ذرة بوحدة الطاقة يساوي $(0.030377\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u}) = 28.30\ \mathrm{MeV}$

طاقة الربط

يسمّى هذا الفرقُ **طاقةَ الترابط الكلية** للنواة. تمثل طاقة الترابط الكلية مقدار الطاقة الذي يجب أن تزوَّد به النواة لكي تنفصل إلى مكوناتها. إذا كانت كتلة النواة، مثلاً $^{4}_{2}\mathrm{He}$، مساوية تمامًا لكتلة نيوترونين زائد بروتونين، فإنّ النواة يمكن أن تنفصل دون أن تمنح طاقة. تكون النواة مستقرة إذا كانت كتلتها أقل من كتلة النيوكلونات المكونة لها، أي أنها تحتاج إلى طاقة حتى تتفكك. لاحظ أنّ طاقة الترابط ليست شيئًا تملكه النواة؛ إنّها الطاقة التي تنقصها بالنسبة إلى مجموع كتلة مكوناتها منفصلة.

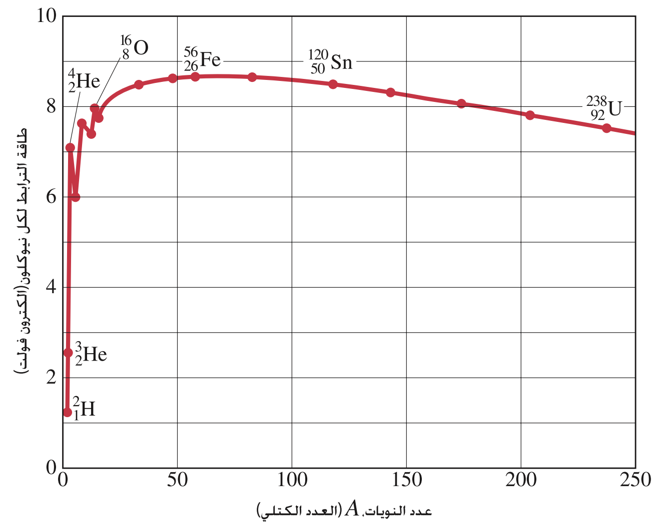
[رأينا في الفصل 27 أنّ طاقة الترابط للإلكترون الواحد في ذرة الهيدروجين تساوي 13.6 eV. وعليه، فإنّ كتلة ذرة $^{1}_{1}\mathrm{H}$ أقلّ من تلك التي لبروتون واحد زائد إلكترون واحد بحوالي $13.6\ \mathrm{eV}/c^2$ أي أنّها صغيرة إلى حدٍّ كبير مقارنة مع الكتلة الكلية للذرة $(939\ \mathrm{MeV}/c^2)$؛ جزء واحد من 10^8. كما أنّ طاقات الترابط للأنوية في حدود MeV. وعليه، فإنّ طاقات الترابط للإلكترونات يمكن أن تهمل لأنّها صغيرة جدًّا في حدود 1 eV.

التمرين (أ) : حدّد بكم تقلّ كتلة نواة $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ عن كتلة مكوناته.

طاقة الترابط للنيوكلون

تعرف **طاقة الترابط للنيوكلون** الواحد على أنّها طاقة الترابط الكلية للنواة مقسومة على العدد الكلي للنيوكليونات A. وجدنا فيما ورد أعلاه أنّ طاقة الترابط لنواة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ تساوي 28.3 MeV. وعليه، فإنّ طاقة الترابط للنيوكلون الواحد فيها تساوي $28.3\ \mathrm{MeV}/4 = 7.1\ \mathrm{MeV}$. يبين (الشكل 30-1) طاقة الترابط للنيوكلون الواحد كدالة في A للأنوية المستقرة. يزداد المنحنى بزيادة A ثم يستقر نسبيًّا عند حوالي 8.7 MeV لكلّ نيوكلون للأنوية التي عددها الكتلي A أكبر من ≈ 40. أما الأنوية التي عددها الكتلي A أكبر من ≈ 80، فإنّ المنحنى ينخفض قليلا، وهذا يشير إلى أنّ الأنوية الثقيلة أقل تماسكًا بقليل من تلك التي تقع في منتصف الجدول الدوري. وسوف نرى لاحقًا أنّ هذه الصفات هي التي تؤدي إلى انطلاق طاقة نووية في عمليات الانشطار والاندماج.

الشكل 30-1 طاقة الترابط للنيوكلون الواحد للأنوية الأكثر استقرارًا كدالة في العدد الكتلي A.



المثال 30-4 **طاقة الترابط للحديد**

احسب طاقة الترابط الكلية وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون لـ $^{56}_{26}Fe$ =النظير الأكثر استقرارًا للحديد.

النّهج: نطرح كتلة ذرة الحديد $^{56}_{26}Fe$ من الكتلة الكلية لـ 26 ذرة هيدروجين و 30 نيوترونا. الكتل جميعها موجودة في الفهرس B. ثم نحول وحدات الكتلة إلى وحدات الطاقة. وأخيرًا نقسم على $A = 56$ العدد الكلي للنيوكلونات.

الحلّ: يحتوي الحديد $^{56}_{26}Fe$ على 26 بروتونا و 30 نيوترونا وكتلتها المنفصلة تساوي (بما فيها 26 إلكترونا)

$$\begin{aligned} 26m(^1_1H) &= (26)(1.007825\ u) = 26.20345\ u \quad \text{(تضم 26 إلكترون)} \\ 30m_n &= (30)(1.008665\ u) = 30.25995\ u \\ \text{sum} &= 56.46340\ u. \\ \text{طرح الكتلة}\ ^{56}_{26}Fe: &= -55.93494\ u \quad \text{(ملحق ب)} \\ \Delta m &= 0.52846\ u. \end{aligned}$$

وهكذا، فإنّ طاقة الترابط الكلية تساوي

$$(0.52846\ u)(931.5\ MeV/u) = 492.26\ MeV$$

وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون تساوي

$$\frac{492.26\ MeV}{56\ \text{نيوكلون}} = 8.79\ MeV$$

ملحوظة: أعلى قيمة لمنحنى طاقة الترابط لكلّ نيوكلون (الشكل 30-1) هي للحديد. ولذلك، فإنّ نواة الحديد (والأنوية المجاورة لها) هي أكثر الأنوية استقرارا.

التمرين (ب): جد طاقة الترابط لكلّ نيوكلون لـ $^{16}_{8}O$

المثال 30-5 **طاقة الترابط للنيوترون الأخير**

ما طاقة الترابط للنيوترون الأخير في $^{13}_{6}C$؟

النّهج: نطرح كتلة $^{13}_{6}C$ من كتلة الذرة منقوصة نيوترونا واحدا، $^{12}_{6}C$ ونيوترونا حرا.

الحلّ: نحصل على الكتل من الفهرس B، فيكون لدينا

$$\begin{aligned} \text{كتلة}\ ^{12}_{6}C &= 12.000000\ u \\ \text{كتلة}\ ^{1}_{0}n &= 1.008665\ u \\ \text{المجموع} &= 13.008665\ u \\ \text{اطرح كتلة}\ ^{13}_{6}C: &\ -13.003355\ u \\ \Delta m &= 0.005310\ u \end{aligned}$$

وهذا بوحدة الطاقة يساوي $(931.5\ MeV/u)(0.005310\ u) = 4.95\ MeV$ أي أنّها تحتاج إلى طاقة مقدارها 4.95 MeV لنزع نيوترون من $^{13}_{6}C$.

القوى النووية

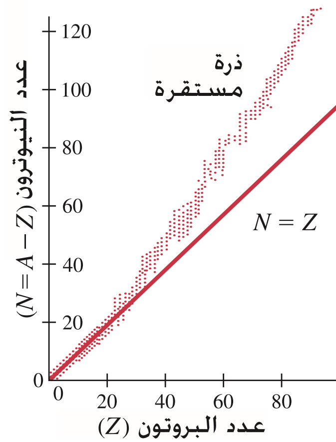
يمكن تحليل الأنوية من وجهة نظر القوى التي تجعل هذه الأنوية متماسكة، وليس من وجهة نظر الطاقة فقط. وعلينا ألا نتوقع أن يكون تجمع البروتونات والنيوترونات مع بعضها تلقائيًا؛ لأنّ البروتونات جميعها موجبة الشحنة. ولهذا، فإنها تؤثر في بعضها بعضًا بقوى تنافر كهربائية. والسؤال المطروح هو: كيف تبقى النواة مجتمعة كوحدة واحدة عند وجود قوى كهربائية بين البروتونات تحاول تفكيكها. وبما أنّ الأنوية المستقرة تبقى متماسكة، فمن الواضح أنه يجب أن تكون هناك قوة أخرى مؤثرة. وبما أنّ هذه القوة الجديدة أكثر شدة من القوة الكهربائية (كما أنّها أكثر شدة من قوة الجاذبية على المستوى النووي)، فإنها تُسَمّى **"القوة النووية القوية"** التي هي قوة تجاذب تؤثر بين النيوكلونات جميعها – البروتونات والنيوترونات على حدّ سواء. وهكذا، فإنّ البروتونات تجذب بعضها بعضًا بواسطة القوة النووية القوية هذه وتتنافر مع بعضها من خلال القوة الكهربائية. أما النيوترونات (المتعادلة كهربائيًا) فإنها تجذب النيوترونات الأخرى أو البروتونات من خلال القوة النووية القوية.

قوة نووية قوية

قوى قصيره المدى وقوى طويله المدى

لقد تبيّن أنّ القوة النووية القوية أكثر تعقيدًا من قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية. إنّ أحد أهمّ ميزات القوة النووية القوية هي أنّها **قوى قصيرة المدى**؛ أيْ أنها تؤثر ضمن مسافة قصيرة جدًّا. فتكون شديدة جدًّا بين نيوكلونين البعد بينهما أقلّ من حوالي 10^{-15} m. ولكنّها تنعدم إذا زادت المسافة بينهما على ذلك. قارن هذه القوى مع قوى الجاذبية والكهربائية التي تتناقص بزيادة المسافة $1/r^2$. ولكن تأثيرها يدوم على أي مسافة والتي تُسَمّى **القوى طويلة المدى**.

للقوة النووية القوية بعض الخصائص الغريبة. فعلى سبيل المثال. إذا كانت نواة ما تحتوي على عدد كثير أو قليل من النيوترونات بالنسبة إلى عدد البروتونات. فإنّ ترابط النيوكلونات يقلّ. وفي هذا المجال. فإنّ الأنوية غير المتوازنة لاتكون مستقرة. وكما هو مبين في (الشكل 30-2). تحاول الأنوية المستقرة امتلاك عدد البروتونات نفسه الذي للنيوترونات. $(N = Z)$ لغاية $A = 30$ أو 40. وبعد هذا الرقم تحتوي الأنوية المستقرة على نيوترونات أكثر من البروتونات. وهذا معقول؛ لأنّه بزيادة Z تزداد قوة التنافر الكهربائية. لذا. تحتاج النواة إلى وجود عدد أكبر من النيوترونات – التي تؤثر فقط بقوة تجاذب نووية – لتحافظ على استقرارها. إذا كان Z كبيرا جدًّا. فإنّ أيّ عدد من النيوترونات لا يستطيع التغلّب على قوة التنافر الكهربائية المتزايدة. في الحقيقة. لا توجد أنوية مستقرة تمامًا بعد $Z = 82$.



الشكل 30-2 عدد النيوترونات مقابل عدد البروتونات للأنوية المستقرة، التي تمثل بالنقاط. الخط المستقيم $N = Z$

قوة ضعيفة

نقصد بالنواة المستقرة تلك التي تبقى مكوناتها مع بعضها بعضًا لفترة غير محددة. أمّا النواة غير المستقرة. فهي التي تنفصل مكوناتها منتجة التفكك الإشعاعي. وقبل مناقشة الموضوع المهم للنشاط الإشعاعيّ(البند التالي). نذكر هنا أنّ هناك نوعًا آخر من القوى النووية أضعف بكثير من القوة النووية القوية يدعى **القوة النووية الضعيفة** التي ندرك وجودها؛ لأنها تظهر في بعض أنواع التفكك الإشعاعي. تشكل هاتان القوتان النوويتان بالإضافة إلى قوة الجاذبية. والقوة الكهرومغناطيسية الأنواع الأربعة للقوى المعروفة في الطبيعة.

3-30 النّشاط الإشعاعي

اكتشاف النشاط الإشعاعي.

لقد كانت بداية علم الفيزياء النووية في سنة 1896. ففي هذه السنة. اكتشف هنري بيكريل (1852-1908) ظاهرة مهمة. وجد في أثناء دراسته للخاصية الفلورية أنّ معدنًا معينًا (يحتوي عادة على اليورانيوم) يجعل لوحًا فوتوغرافيًّا ما أسود حتى عندما يكون اللوح ملفوفًا كي لا يتعرض للضوء. لقد كان واضحًا أنّ المعدن يبعث نوعًا جديدًا من الإشعاعات التي لا تشبه الأشعة السينية. وتحدث دون محفز خارجي. وقد سُمّيت هذه الظاهرةُ أخيرًا **النّشاطَ الإشعاعيَّ**.

بعد اكتشاف بيكريل بفترة قصيرة. قامت ماري كوري (1867-1934) وزوجها بيير كوري (1859-1906) بعزل عنصرين لم يكونا من العناصر المعروفة سابقًا. وقد اسميا هذين العنصرين الراديوم والبولونيوم. ولهما خاصية النّشاط الإشعاعيّ كتلك التي لليورانيوم.



الشكل 30-3 ماري وبيير كوري في المختبر (سنة 1906) حيث اكتشف عنصر الراديوم.

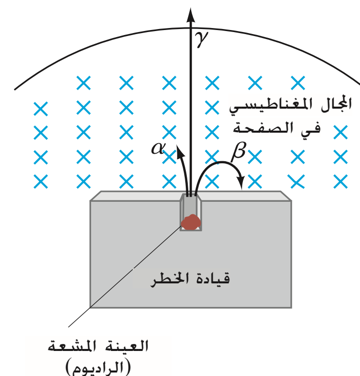
وبعد ذلك بقليل اكتشفت عناصر مشعة أخرى. لقد وجد أنّ الشدة الإشعاعية في كلّ حالة لا تتأثر بالمعالجات الفيزيائية والكيميائية الشديدة، بما في ذلك التسخين الشديد، أو التبريد، والكواشف الكيميائية الشديدة. لقد كان واضحًا أنّ مصدر الشدة الإشعاعية أو الإشعاع لهذه العناصر يجب أن يكون في العمق داخل الذرة، أيْ يجب أن ينبعث من النواة. وهكذا، فقد أصبح واضحًا أنّ النّشاط الإشعاعيّ هو نتيجة تفكك نواة غير مستقرة أو اضمحلالها. إنّ بعض النظائر غير مستقرة وتضمحل مصدرة إشعاعات معينة.

هناك العديد من النظائر غير المستقرة الموجودة في الطبيعة. وفي هذه الحالة، تُسَمّى ظاهرة النّشاط الإشعاعيّ "النّشاط الإشعاعيّ الطبيعي". كما أنّ هناك نظائر أخرى غير مستقرة يمكن إنتاجها صناعيًّا في المختبر عن طريق تفاعلات نووية (البند 31-1). وفي هذه الحالة، تكون ظاهرة النّشاط الإشعاعيّ صناعية.

بدأ رذرفورد وآخرون بدراسة طبيعة الأشعة التي تصدر عن النّشاط الإشعاعيّ في عام 1898 تقريبا. وقد وجدوا أنّ الأشعة الصادرة يمكن أن تقسم إلى ثلاثة أنواع مميزة حسب قدرتها على النفاذية؛ أحد أنواع الإشعاع يستطيع بالكاد النفاذ من خلال قطعة ورق. في حين يستطيع النوع الثاني النفاذ من لوح ألمنيوم سمكه 3 mm. أما النوع الثالث، فهو أكثر قدرة على النفاذية حيث يمكنه النفاذ من عدة سنتيمترات من لوح رصاص، ومازال يمكن كشفه من الجانب الآخر للوح. وقد سميت هذه الأنواع الثلاثة للإشعاع بـ: ـ"ألفا" (α)، و"بيتا (β)، و "جاما (γ) على الترتيب، نسبة إلى الأحرف الثلاثة الأولى في الهجائية اليونانية.

لقد وجد أنّ كلّ نوع من الأشعة له شحنة مختلفة. وبالتالي، فإنّها تنحرف بشكل مختلف في المجال المغناطيسي، (الشكل 30-4): أشعة α موجبة الشحنة، و أشعة β سالبة الشحنة، أمّا أشعة γ فهي متعادلة. وسرعان ما تبين أنّ الأنواع الثلاثة للإشعاع تتكون من أنواع مألوفة من الجُسيمات. أشعة جاما عبارة عن فوتونات ذات طاقة عالية جدًّا، لدرجة أنّها أعلى من الطاقة التي للأشعة السينية. أمّا أشعة بيتا فهي إلكترونات، تماثل تلك التي تدور حول النواة، ولكنها تخلق داخل النواة. في حين أنّ أشعة ألفا (أو جُسيمات α) هي ببساطة أنوية ذرات الهيليوم $^{4}_{2}\text{He}$ ؛ أي أنّ أشعة ألفا تتكون من بروتونين ونيوترونين محصورين مع بعضهما.

وسنناقش الآن كلّ نوع من الأنواع الثلاثة للنشاط الإشعاعيّ أو الاضمحلال بالتفصيل.



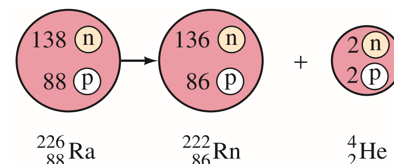
الشكل 30-4 أشعتا ألفا وبيتا تنحرفان باتجاهين متعاكسين بواسطة مجال مغناطيسي، في حين أنّ أشعة جاما لا تنحرف أبدًا.

30-4 باعثات ألفا

إنّ النواة التي تبعث جُسيمات α ($^{4}_{2}\text{He}$) تفقد بروتونين ونيوترونين؛ أي أنّ النواة المتبقية بعد انبعاث α تختلف عن النواة الأصلية. فالراديوم ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 226 على سبيل المثال باعث لجُسيم α، حيث يضمحل إلى نواة عددها الذري $Z = 88 - 2 = 86$، وعددها الكتلي $A = 226 - 4 = 222$. النواة التي لها $Z = 86$ هي الرادون (Rn) – انظر إلى الفهرس B أو الجدول الدوري. وهكذا يضمحل الراديوم إلى رادون مع انبعاث جُسيم ألفا. ويعبّر عن ذلك كما يلي:



انظر إلى (الشكل 30-5)



الشكل 30-5 اضمحلال الراديوم المشع إلى رادون مع انبعاث جُسيمات ألفا.

من الواضح أنّه عندما يحدث اضمحلال α يتشكل عنصر جديد. **النواة الوليدة** (في هذه الحالة $^{222}_{86}\text{Rn}$) تختلف عن **النواة الأم** (في هذه الحالة $^{226}_{88}\text{Ra}$). ويُسَمّى تغيّر أحد العناصر إلى عنصر آخر "تحوّل العنصر"

النواة الوليدة
النواة الأم
تحول العنصر

يكتب اضمحلال ألفا كما يلي:



حيث N هي النواة الأم، في حين تمثّل N' النواة الوليدة، أمّا Z و A فهما العددان الذريّ والكتليّ على التوالي للنواة الأم.

يحدث اضمحلال ألفا لأنّ القوة النووية القوية غير قادرة على جعل الأنوية الثقيلة متماسكة مع بعضها. وبما أنّ القوة النووية هي قوة مدى ذات تأثير قصير، فإنها تؤثر فقط في النيوكلونات المتجاورة. أمّا القوة الكهربائية فتؤثر في جميع أرجاء النواة الثقيلة. وللأنوية الثقيلة كلّها، كلّما كان العدد الذري Z كبيرًا، فإنّ قوة التنافر الكهربائية تصبح كبيرة جدًّا (قانون كولوم) بحيث إنّ القوة النووية القوية تكون غير قادرة على جعل النواة متماسكة مع بعضها.

لماذا لا تستطيع القوة النووية القوية إبقاء النواة متماسكة مع بعضها؟

يمكننا التعبير عن عدم الاستقرار بدلالة الطاقة (أو الكتلة)؛ كتلة النواة الأم أكبر من كتلة النواة الوليدة زائد كتلة جُسيم α. ويظهر الفرق في الكتلة على شكل طاقة حركية يحملها جُسيم α والنواة الوليدة المرتدة. تُسَمّى الطاقةُ الكلية الصادرة **"طاقةَ التفكك" Q**، أو **قيمة Q** للاضمحلال. ومن حفظ الطاقة، نجد أنّ

$$M_P c^2 = M_D c^2 + m_\alpha c^2 + Q$$

حيث $Q = \mathrm{KE}$، وتمثّل M_P، و M_D و m_α كتل النواة الأم، والنواة الوليدة، وجُسيم α على الترتيب. وهكذا فإنّ

قيمة - Q

$$Q = M_P c^2 - (M_D + m_\alpha)c^2 \qquad \textbf{(2 - 30)}$$

إذا كانت كتلة النواة الأم أقلّ من كتلة النواة الوليدة زائد جُسيم ألفا (أي أنّ $Q < 0$)، فإنّ الاضمحلال قد لا يحدث تلقائيًّا؛ لأنّ قانون حفظ الطاقة لا يتحقق.

المثال 30-6 الطاقة الناتجة من اضمحلال اليورانيوم

احسب طاقة التفكك عند اضمحلال $^{232}_{92}\mathrm{U}$ (كتلته = 232.037146 u) إلى $^{228}_{90}\mathrm{Th}$ (228.028731 u) مع انبعاث جُسيم α. (كما هو الحال دائمًا، فإنّ الكتل للذرات المتعادلة).

النّهج: نستعمل حفظ الطاقة كما عبرنا عنه في (المعادلة 30-2). $^{232}_{92}\mathrm{U}$ النواة الأم، و $^{228}_{90}\mathrm{Th}$ النواة الوليدة.

الحلّ: بما أنّ كتلة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ تساوي $4.002603\ u$ (فهرس B)، فإنّ الكتلة الكلية في المرحلة النهائية تساوي

$$228.028731\ \mathrm{u} + 4.002603\ \mathrm{u} = 232.031334\ \mathrm{u}$$

الكتلة المفقودة عندما يضمحل $^{232}_{92}\mathrm{U}$ تساوي

$$232.037146\ \mathrm{u} - 232.031334\ \mathrm{u} = 0.005812\ \mathrm{u}$$

بما أنّ $1\ \mathrm{u} = 931.5\ \mathrm{MeV}$، فإنّ الطاقة Q المنبعثة تساوي

$$Q = (0.005812\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u})$$
$$\approx 5.4\ \mathrm{MeV}$$

وتظهر هذه الطاقة على شكل طاقة حركية لجُسيم ألفا وللنواة الوليدة.

ملحوظة: باستعمال قانون حفظ كمية التحرك، يمكن إثبات أنّ الطاقة الحركية لجُسيم ألفا المنبعث من نواة $^{232}_{92}\mathrm{U}$ ساكنة تساوي 5.3 MeV. وهكذا، فإنّ الطاقة الحركية للنواة الوليدة —التي ترتد بالاتجاه المعاكس لجُسيم α المنبعث— تكون 0.1 MeV تقريبا. انظر إلى المثال التالي و / أو (مسألة 65).

مثال إضافي

المثال 7-30 **الطاقة الحركية KE لجُسيم α في اضمحلال $^{232}_{92}U$**

بالعودة إلى اضمحلال $^{232}_{92}U$ في (المثال 6-30). كم كمية الطاقة التي سيحملها جُسيم α من طاقة التفكك البالغة 5.4 MeV؟

النّهج: في أيّ تفاعل، يجب أن تكون كميّة التحرك محافظة بالإضافة إلى الطاقة.

الحلّ: قبل التفكك، يمكن الافتراض بأنّ النواة ساكنة؛ أي أنّ كميةَ التحرك الكلية صفرٌ. وبعد التفكك، يجب أن يكون متجه كمية التحرك الكلية أيضًا صفرًا، وأنّ مقدار كمية التحرك لجُسيم α يجب أن يساوي مقدار كمية التحرك للنواة الوليدة. (الشكل 6-30):

$$m_\alpha v_\alpha = m_D v_D$$

وهكذا، فإنّ $v_\alpha = m_D v_D / m_\alpha$ وتكون الطاقة الحركية لجُسيم α

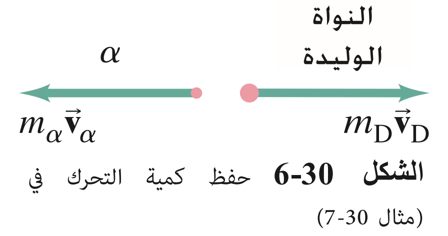
$$KE_\alpha = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{1}{2} m_\alpha \left(\frac{m_D v_D}{m_\alpha}\right)^2 = \frac{1}{2} m_D v_D^2 \left(\frac{m_D}{m_\alpha}\right) = \left(\frac{m_D}{m_\alpha}\right) KE_D$$

$$= \left(\frac{228.028731\ u}{4.002603\ u}\right) KE_D = 57 KE_D$$

طاقة التفكك الكلية هي $Q = KE_\alpha + KE_D = 57KE_D + KE_D = 58KE_D$

وبالتالي فإنّ $KE_\alpha = \frac{57}{58} Q = 5.3\ MeV$

أي أنّ جُسيم α يحمل تقريبًا (57/58)، أو 98 % من الطاقة الحركية الكلية KE.



الشكل 6-30 حفظ كمية التحرك في (مثال 7-30)

لماذا جُسيم α؟

قد تستغرب لماذا تصدر الأنوية هذه المجموعة المكونة من أربعة نيوكلونات، تُسَمّى جُسيم α. لماذا لا تصدر أربعة نيوكلونات منفصلة فقط، أو نيوكلونا واحدًا؟ الإجابة، هي أنّ جُسيم α مقيد بشكل قوي. لذا، فإنّ كتلته أقلّ بشكل ملحوظ من كتلة أربعة نيوكلونات منفصلة. كما رأينا في (المثال 3-30)، فإنّ الكتلة الكلية لبروتونين ونيوترونين بشكل منفصل تساوي 4.032980 u تقريبا(بما في ذلك الإلكترونات).

إنّ الكتلة الكلية لـِ $^{228}_{90}Th$ زائد أربعة نيوكلونات منفصلة تساوي 232.061711 u، وهي أكبر من كتلة النواة الأم (232.037146). مثل هذا الاضمحلال لا يمكن أن يحدث لأنّه ينتهك قانون حفظ الطاقة. وتقريبًا، فإنّ انبعاث نيوكلون واحد غير محتمل من وجهة نظر تتعلق بالطاقة، صحيح دائمًا.

تطبيق- الكواشف الدخانية



يُعدّ كاشف الدخان المألوف أحد التطبيقات واسعة الانتشار للفيزياء النووية والموجودة في كلّ منزل تقريبًا. يحتوي النوع الأكثر شيوعًا منه على حوالي 0.2 mg من نظير الامريشيوم $^{241}_{95}Am$ بصورة AmO_2. تعمل الإشعاعات بشكل متواصل على تأين جزيئات الأكسجين والنيتروجين الموجودة في الهواء بين لوحين متقابلين ومشحونين. وتسبب الموصلية الناتجة من ذلك حدوث تيار مستمر صغير. إذا دخل الدخان إلى الكاشف، فإنّ الإشعاعات تمتص بواسطة جُسيمات الدخان بدلًا من جزيئات الهواء مّا يتسبب بانخفاض التيار. يكتشف هبوط التيار عن طريق الدارة الإلكترونية الموجودة في الجهاز والتي تصدر صوتًا منبها. إنّ الإشعاعات التي تفلت من كاشف الدخان السليم أقلّ بكثير من خلفية الإشعاع الطبيعي. لذا، فإنّها لاتعدّ ضارة نسبيًّا. ولهذا، فإنّ الكواشف الدخانية تحمي الأرواح، وتقلّل من تلف الممتلكات.

5-30 اضمحلال بيتا

اضمحلال β^-

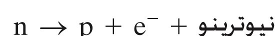
يحدث تحويل العناصر أيضًا عندما تتفكك نواة بواسطة اضمحلال β؛ أي مع انبعاث إلكترون أو جُسيم β^-. على سبيل المثال، تصدر نواة $^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلكترونا عند اضمحلالها:



حيث يشير الرمز e^- إلى الإلكترون. (يستخدم أحيانًا الرمز $^{\;0}_{-1}\mathrm{e}$ للإلكترون الذي شحنته $Z = -1$. وبما أنّه ليس نيوكلونا، وكتلته صغيرة جدًّا فإنّ $A = 0$.) إنّ الجُسيم المسمى نيوترينو، وشحنته $q = 0$، وكتلة سكونه صغيرة جدًّا أو صفر، لم يكتشف في البداية، وافترض وجوده أخيرًا فقط كما سنرى لاحقًا في هذا البند. لا يفقد أيّ من النيوكلونات عندما ينبعث إلكترون، ويبقى العدد الكلي للنيوكلونات A في النواة الوليدة كما هو في النواة الأم. ولكن، بما أنّ الإلكترون صدر من النواة نفسها، فإنّ الشحنة على النواة الوليدة أكبر بواحد من تلك التي على النواة الأم. لاحظ أنّ العدد الذري للنواة الأم في التفكك المبين في المعادلة أعلاه هو $Z = +6$. لذا، وبالرجوع إلى قانون حفظ الشحنة يجب أن تكون شحنة النواة الناتجة $+7e$. وعليه، يكون العدد الذري للنواة الوليدة $Z = 7$، وهو عنصر النيتروجين.

يجب ملاحظة أنّ الإلكترون الذي ينبعث في أثناء اضمحلال β ليس إلكترونًا مداريًّا، ولكنّه يخلق داخل النواة نفسها. أمّا الذي يحدث حقيقة، فهو أنّ أحد النيوترونات يتحول إلى بروتون، وخلال هذه العملية (لحفظ الشحنة) ينبعث إلكترون. وبالفعل، لقد وجد أنّ النيوترونات الحرة تتحلل في الحقيقة كما يلي:

تنويه:
يصدر الإلكترون من النواة في أثناء اضمحلال β
(ولكنه ليس إلكترونًا مداريًّا)



وبما أنّ الإلكترونات التي تنبعث في أثناء اضمحلال β تنشأ داخل النواة، فإنّها تُسَمّى جُسيمات β بدلا من إلكترونات، كي نتذكر منشأها فقط. وبالرغم من ذلك فهي لا تختلف عن الإلكترونات المدارية.

المثال 8-30 الطاقة الناتجة من اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$.

كم الطاقة التي تنبعث عند اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلى $^{14}_{7}\mathrm{N}$ بواسطة انبعاث جُسيم β؟

النّهج: نجد الفرق في الكتلة Δm قبل الاضمحلال وبعده. الطاقة المنبعثة هي $E = (\Delta m)c^2$. الكتل المعروضة في الفهرس B هي للذرات المتعادلة. لذا، يجب تعقب الإلكترونات التي تشتمل عليها. إذا افترضت بأنّ 6 إلكترونات تدور حول النواة الأم، فستكون متعادلة، وتكون كتلتها 14.003242 u. النواة الوليدة في هذا الاضمحلال $^{14}_{7}\mathrm{N}$ ليست متعادلة؛ لأنها تمتلك 6 إلكترونات مدارية تدور حولها، ولكن شحنة النواة $+7e$. على أيّ حال، إنّ كتلة هذه النواة الوليدة مع ستة إلكترونات زائد كتلة الإلكترون المنبعث (سبعة إلكترونات) تساوي تمامًا كتلة ذرة النيتروجين المتعادلة.

تنويه:
يجب أخذ الحذر بالنسبة للكتل الذرية والإلكترونات في أثناء اضمحلال β

الحلّ: الكتلة الكلية في المرحلة النهائية تساوي

(كتلة نواة $^{14}_{7}\mathrm{N}$ + 6 إلكترونات) + (كتلة إلكترون واحد) وهذا يساوي

كتلة $^{14}_{7}\mathrm{N}$ المتعادلة (بما في ذلك 7 إلكترونات)

ومن(الفهرس ب) ، نجد أنّ هذه الكتلة تساوي 14.003074 u. ولهذا، فإنّ الفرق في الكتلة $14.003242\ \mathrm{u} - 14.003074\ \mathrm{u} = 0.000168\ \mathrm{u}$ وهذا يكافىء طاقة مقدارها

$$\Delta m\, c^2 = (0.000168\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u}) = 0.156\ \mathrm{MeV}$$

أو ما يعادل 156 keV

ملحوظة: لا يساهم النيوترينو في اتزان الكتلة أو الشحنة؛ لأنّ $q = 0$، و $m \approx 0$



الشكل 30-7 ساهم إنريكو فيرمي بفاعلية في الفيزياء النظرية والتجريبية، وقام بأعمال فذة قلّ نظيرها في العصر الحديث.

نسبة إلى (المثال *30-8*)، نتوقع أن يمتلك الألكترون المنطلق طاقه حركيه مقدارها *156 keV*. (وبما أن كتلة النوتة الابنة (الجديدة) أكبر أقلّ بكثيرٍ من كتلة الإلكترون، فإنّها ترتدُّ بسرعةٍ قليلةٍ جدًّا، وتحصل على مقدار ضئيل من الطاقة الحركية). وفي الحقيقة، فإنّ القياسات الدقيقة تشير إلى أنّ الطاقة الحركية لعدد قليل من جُسيمات β المنبعثة تكون قريبة من القيمة التي حسبناها. إلا أنّ طاقة الغالبية العظمى من الإلكترونات المنبعثة أقلّ من ذلك نوعًا ما. وفي الواقع، فإنّ طاقة الإلكترون المنبعث يمكن أن تأخذ أيّ قيمة بين صفر وحتى قيمة قصوى كما تم حسابها أعلاه. لقد وجد أنّ مجال الطاقة الحركية هذا يصاحب أيّ اضمحلال لجُسيمات β، كما لو أنّه حدث انتهاك لقانون حفظ الطاقة. وبالفعل، فإنّ العالِمَ بور أخذ هذه الاحتمالية بالحسبان. كما تشير نتائج التجارب الدقيقة إلى أنّ حفظ كمية التحرك الخطية وكمية التحرك الزاوية لم يتحققا، ممّا أدّى إلى قلق الفيزيائيّين من احتمالية التخلي عن هذه القوانين، والتي طبقت بشكل جيد في الحالات السابقة كلها. وفي عام 1930، اقترح العالِمُ ولفجانغ باولي حلاًّ بديلا يتمثّل في احتمالية انبعاث جُسيم جديد مع الإلكترون في أثناء اضمحلال β، ولكن من الصعب الكشف عنه. يحمل هذا الجُسيم الافتراضي الطاقة وكمية التحرك الخطية، والزاوية اللازمة للمحافظة على قوانين الحفظ التي ذكرناها سابقًا. هذا الجُسيم الجديد المسمى **نيوترينو** – أي، جُسيم صغير متعادل – اقترح من قبل الفيزيائي الإيطالي العظيم إنريكو فيرمي

(1901-1954، الشكل 30-7) الذي وضع نظرية اضمحلال بيتا بالتفصيل. (افترض فيرمي في هذه النظرية وجود قوة رابعة في الطبيعة تدعى القوةَ النوويةَ الضعيفةَ) شحنة النيوترينو صفر ومغزليته $\frac{1}{2}\hbar$، وكان يعتقد لفترة طويلة أنّ كتلة السكون له صفر. على الرغم من أنّه في الوقت الحاضر يبدو أنّ هناك احتمالية أن تكون كتلة السكون له صغيرة جدًّا ($< 0.6\,\mathrm{eV}/c^2$). وإذا كانت كتلة السكون له صفرًا، فإنه يشبه إلى حد كبير الفوتون من حيث إنه متعادل ويسير بسرعة الضوء، ولكن الكشف عن النيوترينو يعدّ أكثر صعوبة. وفي عام 1956، قدمت التجارب المعقدة التي أجريت على النيوترينو دليلًا إضافيًّا على وجوده. ولكن في ذلك الوقت، كان أكثر الفيزيائيين قد قبل بوجوده.

اضمحلال β^-

إنّ الرمز الذي يستخدم للدلالة على النيوترينو هو الحرف اللاتيني نيو (ν). وهكذا، فإنّ الطريقة الصحيحة لكتابة اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$ تصبح كما يلي:



$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$$

تدل الإشارة ($^-$) التي فوق الرمز ν على ضديد النيوترينو (النيوترينو الضدّ). (لماذا يُسَمّى هذا ضديد النيوترينو بدلًا من النيوترينو؟ هذا ما سوف نناقشة في الفصل 32، فلا داعي للاهتمام بهذا الآن)

اضمحلال β^+

يحدث اضمحلال العديد من النظائر عن طريق انبعاث إلكترون. تحتوي مثل هذه النظائر دائمًا على عدد كبير من النيوترونات مقارنة مع عدد البروتونات. أي أنّ هذه النظائر تقع بعد النظائر المستقرة التي تم رسمها في (الشكل 30-2). ولكن ماذا عن النظائر غير المستقرة التي تحتوي على عدد قليل من النيوترونات مقارنة مع عدد البروتونات؛ أي التي تقع أسفل النظائر المستقرة الواردة في (الشكل 30-2)؟ لقد تبين أنها تضمحل بإصدار بوزترون بدلا من إلكترون. إنّ كتلة **البوزترون** (يُسَمّى أحيانًا جُسيم β^+ أو e^+) هي كتلة الإلكترون نفسها، ولكن شحنته موجبة $+1e$. وبما أنّه يشبه الإلكترون إلى حدّ كبير باستثناء شحنته، فإنّه يُسَمّى **جُسيمًا ضديدًا** للإلكترون*. كمثال على اضمحلال β^+ هو $^{19}_{10}\mathrm{Ne}$ كما يلي:

اضمحلال البوزترون β^+

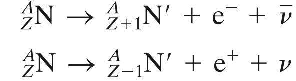


$$^{19}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow {}^{19}_{9}\mathrm{F} + \mathrm{e}^+ + \nu$$

حيث يدل الرمز e^+ (أو $^{0}_{1}\mathrm{e}$) على البوزترون. لاحظ أنّ ν المنبعث هنا هو النيوترينو. في حين أنّ ذاك المنبعث في اضمحلال β^- هو ضديد النيوترينو. وهكذا ينبعث ضديد إلكترون (بوزترون) مع النيوترينو، في حين ينبعث ضديد النيوترينو مع إلكترون. وهو ما يضمّن اتزانًا معينًا كما سيناقش في (الفصل 32).

* جرت مناقشته في (الفصل 32). باختصار، كتلة ضديد الجُسيم هي كتلة الجُسيم المقابل نفسها، ولكن الشحنة معاكسة.

بصورةٍ عامة، يمكننا كتابة اضمحلال β^- و β^+ كما يلي :



$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{N'} + e^- + \bar{\nu} \qquad [\text{اضمحلال } \beta^-]$$

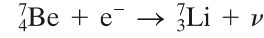
$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N'} + e^+ + \nu \qquad [\text{اضمحلال } \beta^+]$$

حيث N النواة الأم و N′ النواة الوليدة.

الأسر الإلكتروني

الأسْر الإلكترونيّ

إضافة إلى انبعاث جُسيمات β^- و β^+، هناك عملية أخرى تحدث عندما تمتصّ النواة أحد إلكتروناتها المدارية. تُسَمّى هذه العمليةُ **الأسرَ الإلكترونيّ** (تكتب اختصارا EC كما في الفهرس B). وكمثال على ذلك $^{7}_{4}\mathrm{Be}$ الذي يصبح نتيجة لأسر إلكترون. تكتب $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ هذه العملية كما يلي:



$$^{7}_{4}\mathrm{Be} + e^- \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \nu$$

أو بشكل عام



$$^{A}_{Z}\mathrm{N} + e^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N'} + \nu \qquad (\text{التقاط الالكترون})$$

أسْر -K

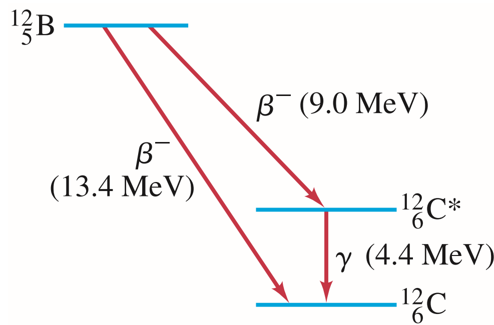
يتمّ أسر الإلكترون غالبًا من الإلكترونات المدارية القريبة من النواة، أي من المدار K، ويُسَمّى في هذه الحالة "الأسر K". يختفي الإلكترون في هذه العملية، ويتحول بروتون داخل النواة إلى نيوترون، ومن ثمّ ينبعث نيوترينو نتيجة لذلك. وقد استدل على هذه العملية تجريبيًا بكشف أشعة X المنبعثة (نتيجة لقفز إلكترونات أخرى لملء الفراغ في المدار الذي أُسر منه الإلكترون) ذات الطاقة المحددة.

في اضمحلال β، تؤدّي القوة النووية الضعيفة دورًا مهمًّا، حيث يتفاعل النيوترينو مع المادة فقط من خلال هذه القوة، وهو ما يفسّر صعوبة الكشف عنه.

6-30 اضمحلال جاما

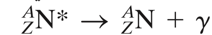
إشعاعات جاما هي عبارة عن فوتونات طاقتها عالية جدًّا. تنشأ هذه الإشعاعات من اضمحلال نواة عنصر ما، تمامًا كانبعاث الفوتونات من ذرة متهيجة. وكالذرة تمامًا، قد تكون النواة في حالة تهيج. وعندما تنتقل إلى حالة أقلّ طاقة (أقلّ تهيّجًا) أو إلى الحالة الأرضية، فإنها تبعث فوتونًا نسميه أشعة γ.

إنّ مستويات الطاقة المتاحة للنواة بعيدة عن بعضها كثيرًا مقارنة مع تلك التي للذرة؛ فهي من رتبة keV، أو MeV مقارنة مع عدة eV بالنسبة للإلكترونات في الذرة. وهكذا، فإنّ الفوتونات المنبعثة تمتلك طاقات تتراوح بين بعض keV إلى عدة MeV. وبالنسبة إلى اضمحلال ما، فإنّ أشعة جاما لها دائمًا الطاقة نفسها. وبما أنّ أشعة γ لا تحمل شحنة، فإنه لا يحدث تغير في العنصر نتيجة لانبعاث أشعة جاما.



الشكل 8-30 يبين مخطط مستوى الطاقة كيفية اضمحلال نواة العنصر $^{12}_{5}\mathrm{B}$ إلى الحالة الأرضية للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ عن طريق انبعاث جُسيم β (الطاقة الكلية المتحررة = 13.4 MeV) أو يمكن أن يؤدي انبعاث جُسيم β إلى حالة التهيج لنواة العنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ (يشار إليها بالنجمة) والتي بدورها تضمحل إلى حالتها الأرضية بانبعاث أشعة جاما طاقتها 4.4 MeV.

كيف تصبح النواة في حالة تهيّج؟ قد يحدث ذلك بسبب تصادم قويّ مع جُسيم آخر. أمّا السبب الأكثر شيوعًا فهو بقاء النواة بعد اضمحلال مشع سابق في حالة تهيج، كما هو موضح في مخطط مستوى الطاقة المبين في (الشكل 30-8). يمكن أن تضمحل نواة العنصر $^{12}_{5}\mathrm{B}$ مباشرة إلى الحالة الأرضية للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ عن طريق انبعاث جُسيم β، أو يمكن أن تنتقل إلى حالة التهيج للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ بانبعاث جُسيم β ثم تضمحل إلى الحالة الأرضية عن طريق انبعاث أشعة γ طاقتها 4.4 MeV يمكن كتابة انبعاث أشعة جاما كما يلي:



$$^{A}_{Z}\mathrm{N}^* \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \gamma \qquad [\text{انبعاث } \gamma]$$

حيث تعني علامة النجمة "حالة التهيج" لتلك النواة.

*الأيسومر؛ التحول الداخلي

التحول الداخلي

قد تبقى النواة أحيانًا في حالة التهيج لبعض الوقت قبل أن تبعث أشعة γ. عندئذ، يقال للنواة بأنها في **حالة شبه مستقرة** وتُسَمّى حينها **الأيسومر**. وأحيانًا، قد تعود النواة المهيجة إلى الحالة الأرضية بواسطة عملية أخرى تعرف بـ**"التحول الداخلي"** دون أن تبعث أشعة γ. تتفاعل النواة المتهيجة في هذه العملية مع أحد الإلكترونات المدارية، وتقذف به خارج الذرة بالطاقة الحركية نفسها (ناقص طاقة الترابط للإلكترون) التي كان يمكن أن تنبعث بها أشعة γ.

ما الفرق بين كلّ من أشعة γ وX؟ كلتاهما إشعاعات كهرومغناطيسية (فوتونات). ومع أنّ إشعاعات γ تمتلك عادةً طاقة أعلى من تلك التي لإشعاعات X، إلا أنّ مدى الطاقات متداخل نوعًا ما. والفرق هنا ليس جوهريًّا. حيث نستعمل مصطلح أشعة X إذا نتج الفوتون من تفاعل إلكترون مع الذرة، أمّا إذا نتج الفوتون من عملية نووية، فنستعمل مصطلح أشعة γ.

7-30 حفظ عدد النيوكلون وقوانين حفظ أخرى

في الأنواع الثلاثة للاضمحلال الإشعاعي، تبقى قوانين الحفظ التقليدية صحيحة. الطاقة، كمية التحرك الخطية، وكمية التحرك الزاوية، والشحنة الكهربائية جميعها محافظة. هذه الكميات تبقى قبل الاضمحلال وبعده كما هي. ولكن هناك قانون آخر للحفظ هو **قانون حفظ عدد النيوكلونات**. بناءً على هذا القانون، فإنّ عدد النيوكلونات (A) يبقى ثابتًا في أيّ عملية، بالرغم من أنّ أحد النوعين قد يتغير إلى النوع الآخر (بروتونات إلى نيوترونات أو العكس). ويجب أنّ يتحقق هذا القانون في الأنواع الثلاثة للاضمحلال. يعرض (الجدول 30-2) ملخصًا لباعثات α، و β، و γ.

الجدول 30-2 الأنواع الثلاثة للاضمحلال الإشعاعي

اضمحلال α:
${}^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{N}' + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$
اضمحلال β:
${}^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{N}' + e^{-} + \bar{\nu}$
${}^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + e^{+} + \nu$
${}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + \nu$ [EC]*
اضمحلال γ:
${}^{A}_{Z}\mathrm{N}^{**} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \gamma$

* الأسر الإلكترونيّ
** تشير إلى حالة التهيج للنواة

8-30 عمر النصف ومعدل الاضمحلال

تحتوي العينة الجاهرية لأيّ نظير مشع على عدد كبير من الأنوية المشعة. وهذه الأنوية لا تضمحل في وقت واحد، وإنما على مدى فترة زمنية. وتُعدّ هذه عملية عشوائية؛ لإنّنا لا نستطيع التنبؤ بالنواة التي سوف تضمحل بصورة مؤكّدة. لكنّنا نستطيع التحديد تقريبًا - على أساس احتمالي- عدد الأنوية التي سوف تضمحل في عينة ما على مدى فترة زمنية معينة، بافتراض أنّ كلّ نواة لها احتمالية الاضمحلال نفسها في كلّ ثانية توجد فيها في العينة.

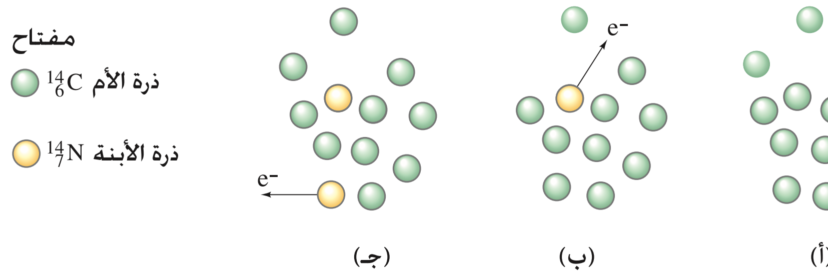
يتناسب عدد الاضمحلالات ΔN الذي يحدث خلال فترة زمنية Δt قصيرة جدًّا مع Δt، وكذلك مع العدد الكلي N للأنوية المشعة الموجودة في العينة:

$$\Delta N = -\lambda N \, \Delta t \qquad \text{(3-30 أ)}$$

حيث تعني الإشارة السالبة أنّ عدد الأنوية N يقل مع الزمن. سنعيد الآن كتابة هذه المعادلة لنحصل على معدل الاضمحلال ونهمل إشارة السالب.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \qquad \text{(3-30ب)}$$

في هاتين المعادلتين، يمثل الرمز λ ثابت تناسب يُسَمّى **ثابت الاضمحلال**، وهو يختلف من نظير إلى آخر. كلّما زادت قيمة λ، كان معدل الاضمحلال ($\Delta N/\Delta t$) أكبر، وتزداد بذلك الشدة الإشعاعية لذاك النظير. ويُرمز إلى عدد الاضمحلال الذي يحدث خلال فترة زمنية Δt قصيرة بالرمز ΔN لأنّ كلّ اضمحلال يحدث يؤدي إلى نقصان عدد الأنوية N الموجودة بمقدار واحد صحيح. أي أنّ الاضمحلال الإشعاعيّ عملية ذات محاولة واحدة، (الشكل 30-9). أي أنه حالما تضمحل النواة الأم إلى النواة الوليدة فإنّها لا تستطيع القيام بذلك مرّةً أخرى.



الشكل 30-9 تضمحل الأنوية المشعة واحدة تلو الأخرى. وهكذا يقل عدد الأنوية الأم الموجودة في العينة بشكل مستمر. عندما تبعث نواة ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلكترونا، فإنها تصبح نواة ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$.

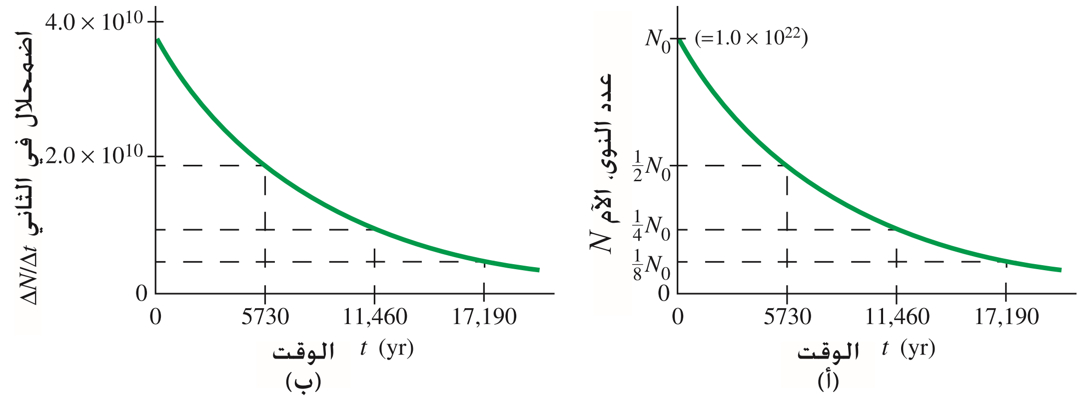
الاضمحلال الأسّيّ

يمكن حلّ (المعادلة 30-3 (أ) أو (ب)) بالنسبة إلى N (باستعمال حساب التفاضل والتكامل) لنحصل على النتيجة التالية:

قانون الاضمحلال الإشعاعيّ

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(30-4)}$$

حيث N_0 عدد الأنوية الموجودة في العينة عند اللحظة $t = 0$. أمّا N فيشير إلى عدد الأنوية المتبقية في العينة بعد مرور زمن معين t. يمثل الرمز e الأساس الطبيعي (مرّ معنا في البندين 19-6 و 21-11) وقيمته $e = 2.718\cdots$. وهكذا فإنّ عدد الأنوية الأم الموجود في العينة يتناقص أسّيًّا مع الزمن كما هو مبين في (الشكل 30-10أ) بالنسبة لاضمحلال $^{14}_{6}C$. تُسَمّى (المعادلة 30-4) قانون الاضمحلال الإشعاعيّ.



الشكل 30-10 (أ) يتناقص عدد الأنوية الأم N في عينة $^{14}_{6}C$ أسّيًّا مع الزمن. (ب) يتناقص أيضًا عدد الاضمحلالات لكلّ ثانية أسّيًّا مع الزمن. عمر النصف لـ $^{14}_{6}C$ يساوي 5730 سنة، وهذا يعني أنّ عدد الأنوية الأم N ومعدّل الاضمحلال $\Delta N/\Delta t$ يتناقص كلّ منهما بمقدار النصف كلّ 5730 سنة.

يُسَمّى عددُ الاضمحلالات لكلّ ثانية الشّدّةَ الإشعاعيةَ للعينة (أو معدل الاضمحلالات).
وبما إنّ $\Delta N/\Delta t$ يتناسب مع N (انظر إلى المعادلة 30-3 ب) فإنّه يتناقص أسّيًّا أيضًا بالمقدار نفسه مع مرور الزمن. (الشكل 30-10 ب). تُعطى الشدة الإشعاعية عند اللحظة t بالعلاقة التالية:

الشّدّة الإشعاعية

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(30-5)}$$

حيث تمثل $(\Delta N/\Delta t)_0$ الشدة الإشعاعية عند اللحظة $t = 0$.

عمر النصف

يحدد معدل الاضمحلال لأيّ نظير بدلالة عمر النصف للنظير بدلًا من ثابت الاضمحلال λ غالبًا. يعرف **عمر النصف للنظير** على أنّه الزمن الذي تستغرقه نصف أنويته الأم حتى تضمحل. فعلى سبيل المثال، عمر النصف لـ $^{14}_{6}C$ حوالي 5730 سنة. فإذا كان عدد الأنوية الموجودة في قطعة خشب متحجرة في لحظة ما يساوي مثلًا 1.00×10^{22} نواة للنظير $^{14}_{6}C$، فإنّها سوف تحتوي على 0.50×10^{22} من هذه الأنوية بعد مرور 5730 سنة. وبعد مرور 5730 سنة أخرى سوف تحتوي على 0.25×10^{22} من هذه الأنوية. وهكذا. وهذا موضح في (الشكل 30-10 أ). وبما أنّ معدل الاضمحلال $\Delta N/\Delta t$ يتناسب مع N، فإنه يتناقص أيضًا بعامل 2 كلّ عمر نصف (الشكل 30-10 ب).
تتراوح أعمار النصف للنظائر المشعة المعروفة من 10^{-22} s إلى حوالي 10^{28} s (حوالي 10^{21} سنة). أعمار النصف للعديد من النظائر معطاة في الفهرس B. ويجب أن يكون واضحًا بأنّ عمر النصف (الذي يرمز إليه $T_{\frac{1}{2}}$) يرتبط بعلاقة عكسية مع ثابت الاضمحلال.
وكلّما كان عمر النصف للنظير أطول (كبير) قلّ اضمحلاله. وبالتالي، فإنّ λ صغير. وبالعكس، فإنّ عمر النصف للنظائر النشطة (λ كبير) قصير جدًّا. وتكتب العلاقة التي تربط بين عمر النصف وثابت الاضمحلال كما يلي:

عمر النصف

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad \textbf{(30-6)}$$

وقد قمنا باشتقاق هذه العلاقة في الدرس الاختياري اللاحق.

* اشتقاق الصيغة الرياضية لعمر النصف، متوسط العمر

يمكننا اشتقاق (المعادلة 30-6) بالبدء من (المعادلة 30-4). وتعويض $N = N_0/2$ عندما $t = T_{\frac{1}{2}}$ وبالتالي

إذن
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة ($\ln$ و e عمليات عكسيّة. أي إنّ $\ln(e^x) = x$) نجد أنّ:

$$\ln\left(e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}}\right) = \ln 2$$

وهكذا فإنّ:

$$\lambda T_{\frac{1}{2}} = \ln 2 = 0.693$$

و

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

وهذه هي (المعادلة 30-6).

يمكننا أيضًا إيجاد متوسط العمر للنظير المشع. يُعرّف متوسط العمر على أنه $\tau = 1/\lambda$، بحيث تكتب (المعادلة 30-4) كما يلي: $N = N_0 e^{-t/\tau}$ تمامًا كما هو الحال بالنسبة لدارات RC، و LR (الفصلان 19 و 21) حيث يُسَمّى τ ثابت الزمن. وعليه، فإنّ متوسط العمر (انظر أيضًا المعادلة 30-6).

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{\frac{1}{2}}}{0.693}$$

تختلف القيمة العددية لعمر النصف عن تلك التي لمتوسط العمر. أي أنّ الخلط بينهما يمكن أن يتسبب بخطأ فادح.

30-9 حسابات تشتمل على معدلات الاضمحلال وعمر النصف

دعنا الآن نفترض بعض الأمثلة، وما الذي يمكن أن نحدّده بالنسبة لعيّنةِ مادةٍ مشعّةٍ إذا عرفنا عمر النصف.

المثال 30-9 الشّدّة الإشعاعية للعينة

يبلغ عمر النصف للنظير $^{14}_{6}C$ 5730 سنة. إذا كان عدد أنوية الكربون 14- الموجودة في عينة في لحظة ما يساوي 1.00×10^{22}، فما الشّدّة الإشعاعية للعينة.

النّهج: نستعمل أولاً عمر النصف لإيجاد ثابت الاضمحلال (المعادلة 30-6)، ثم نستعمله لإيجاد الشّدّة الإشعاعية من (المعادلة 30-3 ب). عدد الثواني في السنة الواحدة يساوي

$$(60)(60)(24)\left(365\tfrac{1}{4}\right) = 3.156 \times 10^7\ \text{s}$$

الحلّ: من (المعادلة 30-6)، نجد ثابت الاضمحلال λ

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{0.693}{(5730\ \text{yr})(3.156 \times 10^7\ \text{s/yr})} = 3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}$$

ومن (المعادلة 30-3ب)، نجد أنّ مقدار الشّدّة الإشعاعية أو معدل الاضمحلال يساوي

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = (3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1})(1.00 \times 10^{22})$$
$$= 3.83 \times 10^{10}\ \text{decays/s.}$$

لاحظ أنّ الرسم البياني الذي في (الشكل 30-10 ب) يبدأ من هذه القيمة مقابل القيمة الأصلية البالغة $N = 1.0 \times 10^{22}$ نواة في (الشكل 30 - 10 أ).

ملحوظة: تُكتب الوحدة اضمحلال/ ثانية (decays/s) غالبًا بشكل أبسط هكذا s^{-1}، لأنّها ليست وحدة قياس، ولكنها تشير فقط إلى عدد. تُسَمّى هذه الوحدة البسيطة للشدة الإشعاعية بـ "بيكريل": 1 Bq = 1 اضمحلال/ ثانية، كما جرت مناقشته في (الفصل 31).

التمرين جـ: حدّد ثابت الاضمحلال للراديوم ($T_{\frac{1}{2}} = 1600\ \text{yr}$)

المثال المفاهيمي 10-30 السلامة: الشّدّة الإشعاعية مقابل عمر النصف

قد يُعتقد أنّ المادة التي عمرها النصفي قصير أكثر أماناً من المادة التي عمرها النصفي طويل لأنّها لا تدوم طويلاً. هل هذا تمثيل دقيق لهذه الحالة؟

الإجابة: لا؛ لأنّ العمر النصفي القصير يعني أنّ الشّدّة الإشعاعية عالية. لذا، تزداد الخطورة. ومن جهة أخرى، فإنّ العمر النصفي القصير يعني أنّ المادة كلّها سوف تضمحل بمستوى منخفض. ولحجم العينة N نفسها، فإنّ المادة التي عمرها النصفي قصير تعني أنّ الشدة الإشعاعية أكثر، ولكن لفترة زمنية قصيرة.

التمرين د: يبلغ عمر النصف للنظير $^{60}_{27}Co$ الذي يستخدم في المستشفيات للعلاج الإشعاعيّ 5.3 سنة. إذا اشترت إحدى المستشفيات عيّنة $^{60}_{27}Co$، فهل ستتلاشى هذه العيّنة خلال 10.6 سنة (ضعف عمر النصف)؟

مثال إضافي

المثال 11-30 عينة مشعة من $^{13}_{7}N$.

يحتوي مختبر على $1.49\ \mu g$ من $^{13}_{7}N$ النقي، والذي يبلغ عمر النصف له $10.0\ min\ (600\ s)$. (أ) كم عدد الأنوية الموجودة بداية في هذه العينة؟ (ب) ما الشدة الإشعاعية الابتدائية للعينة؟ (جـ) ما الشدة الإشعاعية للعينة بعد $1.00\ h$؟ (د) على نحو تقريبيّ، ما الزمن اللازم لانخفاض الشدة الإشعاعية للعينة إلى أقل من واحد لكل ثانية $(1\ s^{-1})$؟

النّهج: نستخدم تعريف المول وعدد أفوجادرو (البندان 13-7 و 13-9) لإيجاد عدد الأنوية في(أ). أمّا بالنسبة إلى الفرع (ب) فنحصل على λ من عمر النصف الوارد في المثال، ونستخدم(المعادلة 30-3 ب) لإيجاد الشدة الإشعاعية. ولحلّ الفرعين (ج) و(د)؛ نستعمل (المعادلة 30-5) و/ أو عمل جدول للزمن.

الحلّ: (أ) الكتلة الذرية 13.0. لذا، فإنّ $13.0\ g$ تحتوي على 6.02×10^{23} نواة (عدد أفوجادرو). وبما أنّ كتلة العينة التي لدينا تساوي $1.49 \times 10^{-6}\ g$، فإنّ عدد الأنوية الموجودة بداية في العينة N_0 تعطى حسب النسبة الآتية:

$$\frac{N_0}{6.02 \times 10^{23}} = \frac{1.49 \times 10^{-6}\ g}{13.0\ g}$$

وعليه، فإنّ $N_0 = 6.90 \times 10^{16}$ نواة.

(ب) من (المعادلة 30-6)، $\lambda = (0.693)/(600\ s) = 1.16 \times 10^{-3}\ s^{-1}$.

وهكذا عندما $t = 0$ نجد من (المعادلة 30-3 ب) أنّ

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0 = (1.16 \times 10^{-3}\ s^{-1})(6.90 \times 10^{16}) = 8.00 \times 10^{13}\ \text{decays/s}$$

(جـ) عمر النصف يساوي $10.0\ min$. لذا، فإنّ معدّل الاضمحلال يتناقص بمقدار النصف كلّ $10.0\ min$. يمكننا عمل جدول للشدة الإشعاعية (كما هو موضح في الهامش) بعد فترات زمنية معينة. وبعد $1.0\ h$، تصبح الشدة الإشعاعية $1.25 \times 10^{12}\ \text{decays/s}$.

الزمن (دقيقة)	الشّدّة الإشعاعية (اضمحلال/ ثانية)
0	8.00×10^{13}
10	4.00×10^{13}
20	2.00×10^{13}
30	1.00×10^{13}
40	0.500×10^{13}
50	0.250×10^{13}
60	0.125×10^{13}

حلّ بديل سهل (ج): 60 دقيقة تعني 6 أضعاف عمر النصف. لذا، فإنّ الشدة الإشعاعية سوف تنخفض إلى $(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})(\frac{1}{2}) = (\frac{1}{2})^6 = \frac{1}{64}$ من قيمتها الأصلية، أو $(8.00 \times 10^{13})/(64) = 1.25 \times 10^{12}$ لكلّ ثانية.

حلّ بديل عام (جـ): الطريقة العامة لإيجاد الشدة الإشعاعية التي تطبق حتى عندما لا يكون الزمن من المضاعفات الصحيحة لعمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$، هي استعمال (المعادلة 30-5). نضع $t = 60.0\ min = 3600\ s$ فنحصل على

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} = (8.00 \times 10^{13}\ s^{-1})e^{-(1.16\times10^{-3}\ s^{-1})(3600\ s)} = 1.23 \times 10^{12}\ s^{-1}$$

ملحوظة: إنّ سبب التناقض البسيط في النتائج هو استخدامنا لثلاثة أرقام معنوية.

(د) نريد تحديد الزمن t عندما $\Delta N/\Delta t = 1.00\ s^{-1}$. ومن (المعادلة 30-5) نجد أنّ

$$e^{-\lambda t} = \frac{(\Delta N/\Delta t)}{(\Delta N/\Delta t)_0} = \frac{1.00\ s^{-1}}{8.00 \times 10^{13}\ s^{-1}} = 1.25 \times 10^{-14}$$

نأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة (تذكر أنّ $\ln e^{-\lambda t} = -\lambda t$) ونقسم على λ، لنجد أنّ

$$t = -\frac{\ln(1.25 \times 10^{-14})}{\lambda} = 2.76 \times 10^4\ s = 7.67\ h$$

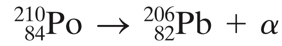
10-30 سلاسل الاضمحلال الإشعاعيّ

كثيرًا ما يضمحل أحد النظائر المشعة إلى نظير آخر مشع أيضًا. أحيانًا، تضمحل هذه النواة الوليدة أيضًا إلى نظير مشع آخر. ويشكل مثل هذا الاضمحلال المتوالي سلسلة تُسَمّى **سلسلة الاضمحلال**. يوضح (الشكل 30-11) مثالاً مهمًا. فكما نرى، يضمحل $^{238}_{92}\mathrm{U}$ عن طريق انبعاث جُسيمات α إلى $^{234}_{90}\mathrm{Th}$، والذي يضمحل بدوره بواسطة انبعاث جُسيمات β إلى $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$. تتوالى هذه السلسلة كما هو مبين مع عدة تفرعات محتملة عند أسفلها، وتنتهي بنظير الرصاص المستقر $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$. يمكن أن يكون الاضمحلال الأخير في هذه السلسلة



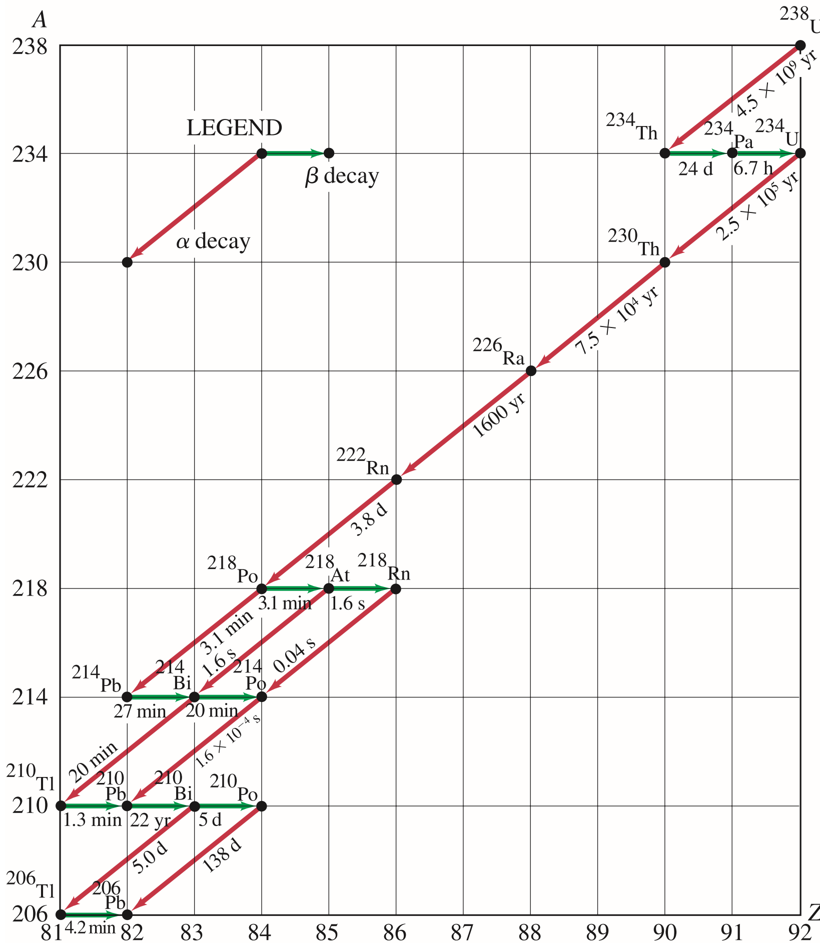
$$^{206}_{81}\mathrm{Tl} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + e^{-} + \bar{\nu}$$

أو



$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + \alpha$$

وهناك أيضًا سلاسل إشعاعية أخرى.



الشكل 30-11 تبدأ سلسلة الاضمحلال بـ $^{238}_{92}\mathrm{U}$. تمثل الأنوية في هذه السلسلة بنقاط تعطي قيم A و Z. تعطى أعمار النصف بالثواني (s)، والدقائق (min) ، والساعات (h)، والأيام (d) والسنوات (yr). لاحظ أنّ السهم الأفقي يمثّل الاضمحلال بانبعاث جُسيم β (A لا تتغير) في حين يمثّل الخطّ القطري الاضمحلال بانبعاث جُسيم α (تتغير A بمقدار 4 و Z بمقدار 2).

توجد بعض العناصر في الطبيعة بسبب مثل سلسلة الاضمحلال هذه، وإلا لما وجدت هذه العناصر، لأنه عندما اكتسب النظام الشمسي شكله الحالي قبل حوالي 5 مليارات سنة، يعتقد بأنّ الأنوية جميعها تقريبًا تشكلت (بواسطة عملية الاندماج، البندان 31-3 و 33-2). إنّ العديد من الأنوية ذات أعمار النصف القصيرة اضمحلت بسرعة، ولم تعد موجودة في الطبيعة في الوقت الحاضر. أما النظائر ذات الأعمار نصف الطويلة، مثل $^{238}_{92}\mathrm{U}$ الذي يبلغ عمره النصفي $4.5 \times 10^{9}\,\mathrm{yr}$، فما تزال موجودة في الطبيعة حتى يومنا هذا. وبالفعل، فإنّ أكثر من نصف $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ما زال موجودًا في الطبيعة (على فرض أنّ النظام الشمسيّ نشأ قبل $5 \times 10^{9}\,\mathrm{yr}$). وعلى أيّ حال، من الممكن أن نتوقع كذلك أنّ الراديوم ($^{226}_{88}\mathrm{Ra}$) وعمره النصفي $1600\,\mathrm{yr}$ قد اختفى من الأرض. أي بحلول هذا الوقت، فإنّ أنوية $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ جميعها يجب أن تكون قد اضمحلت. ومع هذا، بما أنّ $^{238}_{92}\mathrm{U}$ يضمحل (في عدة مراحل) إلى $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$، فإنّ مصدر $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ يتجدد باستمرار، وهذا هو سبب وجوده على الأرض حتى الآن. كما أنّ الشيء نفسه ينطبق على العديد من الأنوية المشعة الأخرى.

المثال المفاهيمي 12-30 سلسلة الاضمحلال

تبدأ سلسلة الاضمحلال التي في (الشكل 11-30) بـ $^{234}_{92}U$، ولها أربع أنوية متعاقبة أعمار النصف لها 250,000 yr, 75,000 yr, 1600 yr والقليل منها أقلّ من 4 أيام. إنّ كلّ اضمحلال في هذه السلسلة يرافقه انبعاث جُسيم ألفا ذي طاقة محددة. لذلك، يمكن مراقبة معدل الاضمحلال الإشعاعيّ لكلّ نواة. أعطيت عينة $^{234}_{92}U$ نقية قبل مليون سنة. أيّ اضمحلال لجُسيم ألفا تتوقع أن تكون شدته الإشعاعية في العينة أكبر ما يمكن؟

الإجابة: من الطبيعي القول إنّ العملية التي عمرها النصفي أقصر ما يمكن، تكون شدّتها الإشعاعية أكبر ما يمكن. وعلى أيّ حال، فإنّ معدلات الاضمحلال في هذه العينة جميعها متساوية. ويعزى السبب في ذلك إلى إنّ اضمحلال النواة الأم في كلّ حالةٍ يمثل عنق الزجاجة لاضمحلال النواة الوليدة. فعلى سبيل المثال، عند مقارنة عمر النصف لـ $^{226}_{88}Ra$ والبالغ 1600 yr، فإنّ نواته الوليدة $^{222}_{86}Rn$ تضمحل لحظيًّا تقريبًا، ولكنها لا يمكن أن تضمحل إلّا عندما تتشكل. (هذا يشبه تجمع لخط سيارات: فإذا احتاج العامل A إلى 20 دقيقة للقيام بوظيفة ما، والعامل B يحتاج إلى دقيقة واحدة للقيام بالوظيفة التالية، فإنّ العامل B ما زال يحتاج إلى 20 دقيقة للقيام بوظيفته في سيارة واحدة).

11-30 تقدير العمر بواسطة الشّدّة الإشعاعية

هناك العديد من التطبيقات المفيدة للاضمحلال الإشعاعي. تشتمل أحد هذه التطبيقات على تحديد عمر مواد قديمة بواسطة الشدة الإشعاعية.

تطبيقات فيزيائية
التأريخ باستخدام الكربون -14

إنّ عمر أيّ جسم تشكل من مادة حية كالخشب مثلا، يمكن تحديده باستعمال الشدة الإشعاعية الطبيعية للنظير $^{14}_{6}C$. إنّ النباتات الحية جميعها تمتصّ ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من الهواء، وتستخدمه في تركيب جزيئات عضوية. إنّ الغالبية العظمى من ذرات الكربون هذه هي للنظير $^{12}_{6}C$، وأنّ جزءًا صغيرًا حوالي 1.3×10^{-12} للنظير المشع $^{14}_{6}C$. إنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي ثابتة تقريبًا على مدى آلاف السنين بالرغم من أنّ $^{14}_{6}C$ يضمحل بعمر نصفي يبلغ حوالي 5730 yr. والسبب في ذلك هو أنّ الأنوية التي تحمل طاقة في الإشعاعات الكونية (التي تدخل إلى الغلاف الجوي) تصطدم مع أنوية ذرات في الغلاف الجوي فتفكّكها إلى قطع باعثة نيوترونات حرة. ومن الممكن إنّتصادم هذه النيوترونات مع أنوية ذرات النيتروجين في الغلاف الجوي لتنتج التحول النووي التالي: $n + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + p$ أي أنّ النيوترون المهاجم يمتص بواسطة نواة $^{14}_{7}N$، وينتج بروتون من هذه العملية. النواة المتبقية هي $^{14}_{6}C$. هذا الإنتاج المتواصل لـ $^{14}_{6}C$ في الغلاف الجوي يوازن تقريبًا المفقود من $^{14}_{6}C$ بسبب الاضمحلال الإشعاعي. وطالما أنّ النبتة أو الشجرة حية، فإنّها تستعمل، وبشكل مستمر، الكربون من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء لبناء أنسجة جديدة واستبدال القديم منها. كما أنّ الحيوانات بدورها تأكل النباتات، وتحصل على الكربون اللازم لأنسجتها.

تكون ^{14}C في الغلاف الجوي

إنّ الكائنات الحية لا يمكن أن تميز* $^{14}_{6}C$ من $^{12}_{6}C$، وبما أنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي تبقى ثابتة تقريبًا، فإنّ نسبة النظيرين أيضًا تبقى ثابتة تقريبًا. وعندما يموت كائن حيّ، فإنه لا يمتص ثاني أكسيد الكربون. وبما أنّ $^{14}_{6}C$ يضمحل إشعاعيًّا، فإنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ فيه تقل مع مرور الزمن. وحيث إنّ عمر النصف للنظير $^{14}_{6}C$ يبلغ حوالي 5730 yr، فإنّ النسبة $^{14}_{6}C/^{12}_{6}C$ في أداة خشبية قديمة هي نصف تلك الموجودة في أشجار ما زالت تعيش، وهذا يعني أنّ تلك الأداة صنعت من شجرة قطعت قبل حوالي 5730 سنة. وفي الحقيقة، يجب تصحيح هذا؛ لأنّ النسبة $^{14}_{6}C/^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي لا تبقى ثابتة بشكل دقيق مع مرور الزمن. ولتحديد هذه النسبة على مدى قرون؛ فإننا نحتاج إلى تقنيات، مثل مقارنة النسبة المتوقعة مع النسبة الحقيقية لأجسام أعمارها معروفة، فالأشجار القديمة جدًّا يمكن حساب حلقاتها السنوية بدقة معقولة.

* تعمل الكائنات الحية تقريبًا من خلال التفاعلات الكيماوية التي تشتمل على الإلكترونات المدارية الخارجية للذرة. أمّا النيوترونات الإضافية في النواة فليس لها أيّ تأثير أساسًا.

مثال إضافي

المثال 30-13 **حيوان هالك منذ زمن بعيد**

كتلة الكربون في جزء من عظمة حيوان وجدت في موقع أثري تساوي 200 g. إذا سجلت العظمة شدة إشعاعية مقدارها 16 decays/s. فما عمر هذه العظمة؟

النّهج: نحدّد أولا عدد ذرات $^{14}_{6}C$ التي كانت موجودة في العينة البالغة 200 g عندما كان الحيوان حيًّا. على اعتبار أنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ تساوي 1.3×10^{-12}. ثم نستخدم (المعادلة 30 − 3 ب) لإيجاد الشدة الإشعاعية في ذلك الوقت. في حين نستخدم (المعادلة 30 − 5) لإيجاد الزمن t الذي مرّ على تلك الشدة الإشعاعية.

الحل: إنّ الكمية 200 g من الكربون جميعها تقريبًا $^{12}_{6}C$؛ كلّ 12.0 g من $^{12}_{6}C$ تحتوي على 6.02×10^{23} من الذرات. لذا، فإنّ 200 g تحتوي على

$$\left(\frac{6.02 \times 10^{23}\ \text{atoms}}{12\ \text{g}}\right)(200\ \text{g}) = 1.00 \times 10^{25}\ \text{atoms}$$

عندما كان الحيوان حيّا، كانت نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في العظمة تساوي 1.3×10^{-12}. لذا، فإنّ عدد أنوية $^{14}_{6}C$ في ذلك الوقت يساوي

$$N_0 = (1.00 \times 10^{25}\ \text{atoms})(1.3 \times 10^{-12}) = 1.3 \times 10^{13}\ \text{atoms}$$

ومن (المعادلة 30 − 3ب)، نجد أنّ مقدار الشدة الإشعاعية عندما كان الحيوان حيّا ($t = 0$) يساوي

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0$$

حيث $\lambda = 3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}$ كما تمّ حسابها في (المثال 30 − 9). لذلك، فإنّ الشدة الإشعاعية الأصلية كانت

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0 = (3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1})(1.3 \times 10^{13}) = 50\ \text{s}^{-1}$$

ومن (المعادلة 30 − 5)، نجد أنّ

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t}$$

حيث $\Delta N/\Delta t$ أعطيت في المثال على أنّها تساوي $16\ \text{s}^{-1}$. أي أنّ

$$16\ \text{s}^{-1} = (50\ \text{s}^{-1})e^{-\lambda t}$$

أو

$$e^{\lambda t} = \frac{50}{16}$$

وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة، سنحصل على

$$t = \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{50}{16}\right) = \frac{1}{3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}}\ \ln\left(\frac{50}{16}\right)$$
$$= 2.98 \times 10^{11}\ \text{s} = 9400\ \text{yr}$$

وهذا هو الزمن الذي مرّ على موت هذا الحيوان.

تطبيق الفيزياء
تحديد عمر الآثار

مقياس الزمن الجيولوجي لتحديد العمر

إنّ تحديد العمر بواسطة الكربون مفيد فقط بالنسبة إلى الأجسام التي عمرها أقلّ من 60,000 سنة تقريبا؛ لأنّ الكمية المتبقية من $^{14}_{6}C$ في الأجسام الأقدم من ذلك تكون عادة صغيرة جدًّا، ولا يمكن قياسها بدقة. ومع هذا، فإنّ التقنيات الحديثة تسمح بالكشف حتى عن كميات صغيرة جدًّا من $^{14}_{6}C$، وهو ما أدى إلى جعل الإطار الزمني أبعد من 60,000 سنة. ومن جهة أخرى، فإنّ النظائر المشعة التي أعمارها النصفية طويلة يمكن أن تستخدم في ظروف معينة لتحديد أعمار أجسام أقدم من ذلك. على سبيل المثال، يعدّ عنصر $^{238}_{92}U$ مفيدا في تحديد أعمار الصخور على مقياس الزمن الجيولوجي بسبب عمره النصفي الطويل الذي يبلغ حوالي 4.5×10^{9} سنة. عندما تصلبت مادة منصهرة على سطح الأرض منذ زمن بعيد وتحولت إلى صخرة بانخفاض درجة حرارتها، فإنّ مركبات مختلفة تتصلب حسب درجات انصهارها، وهذه المركبات المختلفة تنفصل عن بعضها نوعًا ما.

تطبيق الفيزياء
التأريخ الجيولوجي

وبناء على ذلك، فإنّ اليورانيوم الموجود في مادة ما يصبح ثابتًا في مكانه، وكذلك الأنوية الوليدة التي تنتج من اضمحلال اليورانيوم تبقى أيضًا ثابتة في ذلك الموضع. وبقياس كمية $^{238}_{92}\mathrm{U}$ المتبقية في المادة بالنسبة إلى كمية الأنوية الوليدة، يمكن تحديد الزمن عندما تصلبت الصخرة.

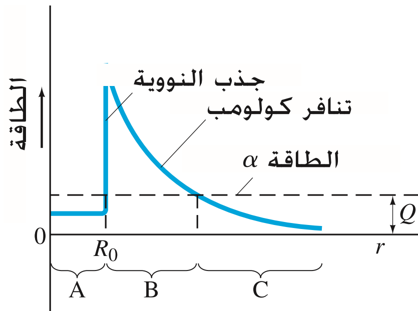
تطبيق الفيزياء
أقدم صخور الأرض

أثبتت طرق تحديد العمر بواسطة الشدة الإشعاعية باستعمال $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ونظائر أخرى أنّ عمر أقدم صخور الأرض يبلغ حوالي 4×10^9 y. يشير عمر الصخور التي تحتوي على أقدم الكائنات الحية المتحجرة إلى أنّ الحياة بدأت قبل أكثر من 3.5 مليار سنة. أمّا بقايا أقدم الثدييات المتحجرة فقد وجدت في صخور عمرها 200 مليون سنة. وأنّ أول المخلوقات التي تشبه الجنس البشري يبدو أنّها ظهرت قبل حوالي مليوني سنة. وهكذا، فإنّ تحديد العمر بواسطة النّشاط الإشعاعيّ أساسيّ في إعادة بناء تاريخ الأرض.

* 12-30 الاستقرار وتأثير النفق

رأينا سابقًا أنّ الاضمحلال الإشعاعيّ يحدث فقط عندما تكون كتلة النواة الأم أكبر من مجموع كتل النواة الوليدة والجُسيمات المنبعثة جميعها. على سبيل المثال، يمكن أن تضمحل نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$ إلى $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ لأنّ كتلة $^{238}_{92}\mathrm{U}$ أكبر من كتلة $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ زائد كتلة جُسيم ألفا. وبما أنّ الأنظمة تميل إلى الذهاب في الاتجاه الذي يؤدي إلى خفض طاقتها الداخلية أو طاقة الوضع (تتدحرج الكرة إلى أسفل التلة، تتحرك الشحنة الموجبة نحو الشحنة السالبة) فإنك قد تستغرب عدم تفكّك النواة غير المستقرة فورًا. وبكلمات أخرى، لماذا أنوية $^{238}_{92}\mathrm{U}$ $(T_{\frac{1}{2}} = 4.5 \times 10^9\ \mathrm{yr})$ والنظائر الأخرى أعمارها النصفية طويلة؟ لماذا لا تضمحل الأنوية الأم جميعها فورًا؟

إنّ الإجابة لها علاقة بالنظرية الكمية وطبيعة القوى الموجودة. يمكن دراسة هذه الحالة بمساعدة مخطط طاقة الوضع كما في (الشكل 30 − 12).



الشكل 30 − 12 طاقة الوضع لجُسيم α والنواة، مبينًا حاجز كولوم الذي يجب أن يمر خلاله جُسيم α لكي يفلت من النواة. قيمة Q لهذا التفاعل موضحة أيضًا على الشكل.

دعنا نفترض حالة معينة للاضمحلال $^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$. يمثل الخط الأزرق طاقة الوضع بما فيها كتلة السكون، حيث تَخَيَّلْنا جُسيم α على أنّه كينونة مستقلة داخل نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$. تمثل المنطقة المشار إليها بالحرف A، طاقة الوضع لجُسيم α عندما يكون محتجزًا داخل اليورانيوم بواسطة القوة النووية (R_0 نصف قطر النواة). تمثل المنطقة C طاقة الوضع عندما يكون جُسيم α غير مرتبط مع النواة. أما الجزء المتجه نحو الأسفل من منحى طاقة الوضع (يتناسب مع $1/r$) فيمثل التنافر الكهربائي (قانون كولوم) بين جُسيم α المشحون بشحنة موجبة ونواة $^{234}_{90}\mathrm{Th}$.

وللوصول إلى المنطقة C، فإنّ جُسيم α يجب أن يجتاز حاجز كولوم المبين في الشكل. وبما أنّ طاقة الوضع تمامًا ما بعد $r = R_0$ (المنطقة B) أكبر من طاقة جُسيم ألفا (الخط المقطع)، فإنّ جُسيم α لا يستطيع أن يفلت من النواة إذا كان محكومًا بالفيزياء الكلاسيكية. ولكن إذا منح طاقة مساوية لارتفاع الحاجز فعندها يستطيع الانفلات. وعلى أيّ حال، فإنّ الأنوية تضمحل تلقائيًّا دون أن تُمنح أيّ طاقة. كيف يمكن لجُسيم α أن ينتقل من المنطقة A إلى C؟ في الحقيقة، إنه يمر خلال الحاجز في عملية تُسَمّى **تأثير النفق**. أمّا من وجهة نظر كلاسيكية فإنّ هذا لا يمكن أن يحدث؛ لأنّ جُسيم α في المنطقة B (داخل الحاجز) ينتهك مبدأ حفظ الطاقة*. ومع هذا، يشير مبدأ عدم التحديد إلى أنّ حفظ الطاقة يمكن أن ينتهك بالمقدار ΔE خلال الفترة الزمنية Δt كما في العلاقة

النفق

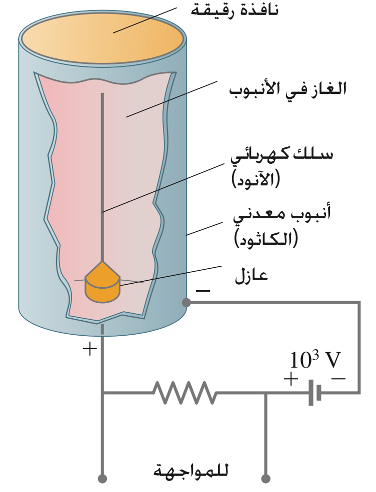
$$(\Delta E)(\Delta t) \approx \frac{h}{2\pi}$$

رأينا في (البند 28 − 3) أنّ هذه العلاقة نتيجة لازدواجية جُسيم − موجة. وهكذا، فإنّ الميكانيكا الكمية تسمح بانتهاك قانون حفظ الطاقة لفترات قصيرة قد تكون طويلة بما فيه الكفاية بالنسبة إلى جُسيم α لعبور الحاجز. تمثل ΔE الفرق في الطاقة بين متوسط ارتفاع الحاجز وطاقة الجُسيم، في حين يمثّل Δt الزمن اللازم للمرور خلال الحاجز. كلما زاد ارتفاع الحاجز وعرضه قلّ الزمن Δt المتاح لجُسيم α للإفلات، ومن غير المرجح أن يقوم بذلك. وهكذا، فإنّ ارتفاع هذا الحاجز وعرضه يتحكمان في معدل الاضمحلال وعمر النصف للنظير.

* الطاقة الكلية E (الخط المقطع في الشكل 30 − 12) ستكون أقل من طاقة الوضع PE؛ لأنّ الطاقة الحركية $\mathrm{KE} = \frac{1}{2}mv^2 > 0$ موجبة، لذا، لا يمكن أن تكون $E = \mathrm{KE} + \mathrm{PE}$ أقلّ من PE من وجهة نظر كلاسيكية.

13-30 الكشف عن الإشعاعات

لا يمكن الكشف عن الجُسيمات المنفردة مثل الإلكترونات، والبروتونات، وجُسيمات α، والنيوترونات، وأشعة γ مباشرة بواسطة حواسنا. ولهذا، فقد تمّ تطوير أجهزة مختلفة للكشف عنها. إنّ أحد أكثر هذه الأجهزة شيوعًا هو **عداد غايغر** الذي يتكون، كما هو مبين في (الشكل 30 − 13)، من أنبوب فلزي أسطواني الشكل مليء بنوع معين من الغاز. يتصل سلك طويل ينطبق تمامًا على محور الأسطوانة مع جهد موجب مرتفع $(\approx 10^3\ V)$ بالنسبة للأسطوانة الخارجية. وهذا الجهد أقلّ قليلا من ذاك اللازم لتأيين ذرات الغاز. عندما يدخل جُسيم مشحون خلال نافذة رقيقة عند إحدى نهايتي الأنبوب، فإنه يؤيّن عددًا قليلًا من ذرات الغاز. تنجذب الإلكترونات المتحررة نحو السلك الموجب، وبما أنّها تتسارع، فإنها تهاجم ذرات إضافية وتؤيّنها. يحدث انهيار سريع للإلكترونات (أي ينتج عدد كبير من الإلكترونات) وعندما تصل إلى سلك المصعد تُنتج نبضة كهربائية. يتمّ تمرير النبضة بعد تضخيمها إلى عداد إلكتروني يحسب عدد الجُسيمات التي تمّ كشفها. كما يمكن إرسال النبضات إلى مكبر صوت، وكلّما يكشف عن جُسيم يُسْمعُ صوتُ طقطقة. إنّ أيّ كاشف يكتشف جزءًا فقط من الإشعاعات المنبعثة مع عينة ما.



شكل 30 − 13 رسم توضيحي لعداد غايفر

مواد وصيفية

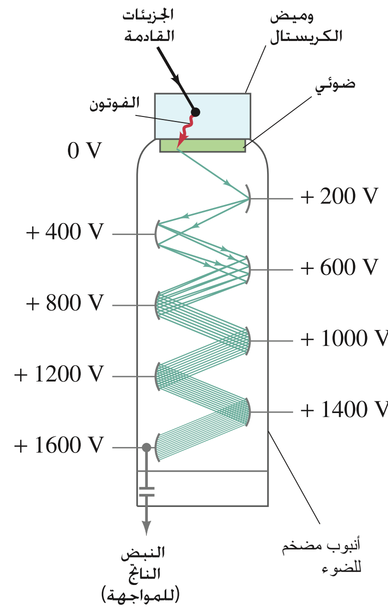
يستخدم في العداد الوميضي مادة تعرف بالمادة الوميضية أو الفسفور، وهي إما أن تكون صلبة، أوسائلة، أو غازية. تتهيج ذرات المادة الوميضية بسهولة عندما تهاجم بواسطة جُسيم يسقط عليها، وتبعث ضوءًا مرئيًّا عندما تعود إلى حالاتها الأرضية. المواد الوميضية عبارة عن بلورات NaI ولدائن معينة. يلتصق أحد وجهي المادة الوميضية الصلبة مع أنبوب التضاعف الفوتوني، وتلف جميعها بمادة معتمة، أو توضع داخل حافظة محكمة الإغلاق لمنع وصول الضوء إليها. يقوم أنبوب التضاعف الفوتوني بتحويل طاقة الفوتون المنبعث من المادة الوميضية إلى نبضة كهربائية.

أنبوب التضاعف الفوتوني *PM*

إنّ أنبوب التضاعف الفوتوني عبارة عن أنبوب مفرغ من الهواء يحتوي على العديد من الأقطاب (8 إلى 14) تعرف بالدينودات، موصولة مع جهود تتزايد بشكل متوالٍ كما هو مبين في (الشكل 30 − 14). وعند سطحه العلوي، يوجد سطح كهروضوئي يُسَمّى الكاثود الضوئي الذي دالة شغله (البند 27 - 3) صغيرة إلى الحدّ الذي يسمح لإلكترون أن ينطلق بسهولة عندما يُهاجم بواسطة فوتون من المادة الوميضية. يتسارع مثل هذا الإلكترون نحو الدينود الأول، وعندما يضرب الدينود الأول، يكتسب هذا الإلكترون طاقة حركية كافية تجعله يُخرج إلكترونين إلى خمسة إلكترونات إضافية. وهذه الإلكترونات تتسارع بدورها نحو الدينود الثاني، وتبدأ عملية التضاعف لعدد الإلكترونات. وقد يصل عدد الإلكترونات التي تهاجم الدينود الأخير إلى 10^6 أو أكثر.

وهكذا، فإنّ مرور جُسيم خلال المادة الوميضية يؤدي إلى نبضة كهربائية عند مخرج أنبوب التضاعف الفوتوني، وترسل إلى عداد إلكتروني تمامًا كما هو الحال في أنبوب غايغر.

(الشكل 30 − 14) عداد وميضي مع أنبوب التضاعف الفوتوني



تعدّ المواد الوميضية الصلبة أكثر كثافة من الغاز الموجود في عداد غايغر. والكواشف الوميضية أكثر كفاءة في الكشف عن الإشعاعات. وخصوصًا إشعاعات جاما التي تفاعلها مع المادة أقلّ من تفاعل إشعاعات β. تستعمل المواد الوميضية التي يمكنها قياس الطاقة الكلية التي تودع فيها كثيرًا هذه الأيام. وتُسَمّى **مساعر**.

المِسعر

غالبًا ما تستخدم **المواد الوميضية السائلة** في تقفي الأثر (البند 31 – 7). عينات مشعة تؤخذ عند فترات زمنية مختلفة من أجزاء مختلفة من الكائن الحي. وتوضع مباشرة في عبوات زجاجية صغيرة تحتوي على مادة وميضية سائلة. وهذا مناسب بشكل خاص للكشف عن إشعاعات β ذات الطاقات المنخفضة جدًّا المنبعثة من $^{3}_{1}H$ و $^{14}_{6}C$. وتمر بصعوبة خلال الغطاء الخارجي لبلورة المادة الوميضية أو أنبوب غايغر. ويبقى أنبوب التضاعف الفوتوني PM يستعمل لتوليد النبضة الكهربائية.

يتكون **المكشاف شبه الموصل** من دايود ثنائي الوصلة منحازا عكسيًّا (البند 29 – 8). يمر جُسيم خلال الوصلة. يستطيع تهييج الإلكترونات في الحزمة الموصلة تاركًا ثقوبا في حزمة التكافؤ. تنتج الشحنات المتحررة نبضة كهربائية قصيرة يمكن عدها تمامًا كما في عدادات غايغر والوميضية. تحفر على سطح رقاقة سيلكون شبه موصلة خلايا صغيرة جدًّا لتعطي معلومات تفصيلية عن موضع الجسم.

مكشاف شبه موصل (ثنائي الوصلة)

يحمل عمال المستشفيات ومن يعمل في مجال الإشعاع أيضًا شارات فيلمية تكشف عن الإشعاعات المتراكمة. يُستبدل الشريط الذي في الداخل بشكل دوري ثم يُظهر. والبقع السوداء التي تظهر عليه ترتبط مع التعرض الكلي (انظر إلى البند 31 – 5).

إنّ الأجهزة التي قمنا بدراستها حتى الآن تحسب عدد الجُسيمات (أو عدد الاضمحلال للنظير المشع). وهناك أجهزة أخرى تسمح بتقفي أثر الجُسيمات المشحونة لترى بشكل واضح. إنّ أبسط هذه الأجهزة هو **مستحلب التصوير**. وهو جهاز صغير قابل للحمل ويستخدم الآن بشكل خاص لدراسة الأشعة الكونية بواسطة البالونات. يمر الجُسيم المشحون خلال طبقة من مستحلب التصوير. ويؤيّن ذراته على طول المسار الذي يسلكه. يحدث لهذه النقاط تغيّر كيماوي. وعندما يُظهر المستحلب يظهر مسار الجُسيم. (أحد أنواع النيوترينو τ كان قد اكتشف بطريقة غير مباشرة بواسطة مستحلب في مختبر فيرمي: انظر الفصل 32).

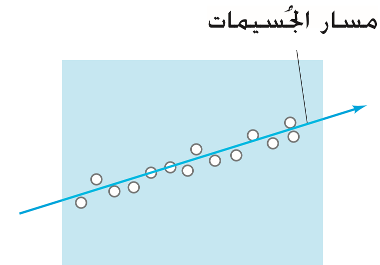
المستحلب

في **الغرفة السحابية**. يُبرد غاز ما إلى درجة حرارة أقل قليلًا من نقطة التكاثف الاعتيادية (فائق التبريد). وتتكاثف جزيئات الغاز على الجزيئات المؤينة الموجودة. تنتج الأيونات عندما يمرّ جُسيم مشحون خلال الغاز. ويعمل كمركز تتشكل عليه قطرات دقيقة جدًّا (الشكل 30 – 15). يتشتت الضوء من هذه القطرات أكثر من قطرات الغاز (الخلفية الأرضية للغاز). وهكذا. فإنّ صورة الغرفة السحابية في اللحظة المناسبة تبين مسار الجُسيم المشحون. لقد استخدم هذا الجهاز المهم كثيرا في بداية دراسة الفيزياء النووية. أمّا في الوقت الحاضر فهو قليل الاستعمال.

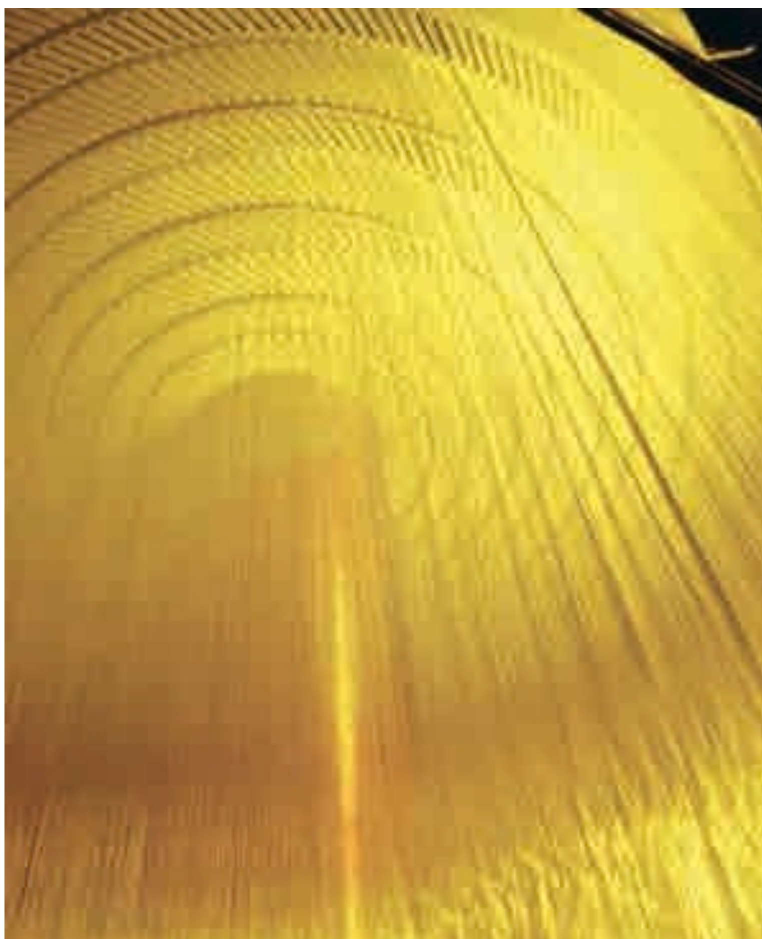
الغرفة السحابية

تستخدم **الغرفةُ الفقاعية** التي اكتشفها غلاسر (1926-) عام 1952 سائلًا فائق التسخين. يحفظ قريبًا من نقطة غليانه الطبيعية. يتشكل حول الفقاعات الناتجة من الغليان أيونات ناتجة من مرور جُسيم مشحون. تظهر صورة ما داخل الغرفة مسارات الجُسيمات المشحونة التي مرت خلالها حديثًا. وبما أنّ الغرفة الفقاعية تستخدم مادة سائلة- في أغلب الأحيان الهيدروجين السائل- فإنها جهاز أكثر كفاءة من الغرفة السحابية من حيث مشاهدة أثر الجُسيمات المشحونة وتفاعلاتها مع أنوية السائل. وعلى الأغلب. يطبق مجال مغناطيسي بين طرفي الغرفة لتحديد كمية التحرك للجُسيمات المتحركة من نصف قطر انحناء مساراتها.

الغرفة الفقاعية



الشكل 30 – 15 في الغرفة السحابية أو الفقاعية، تتشكل قطرات أو فقاعات حول الأيونات الناتجة من مرور جُسيم مشحون.



الشكل 30 – 16 غرفة الانسياق نحو السلك داخل كاشف التصادم في مختبر فيرمي (CDF).
التقطت الصورة التي في افتتاحية (الفصل 32 - صفحة 889) بواسطة هذا الكاشف.

غرفة الانسياق نحو السلك

تتكوّن **غرفة الانسياق** نحو السلك من مجموعة أسلاك دقيقة قريبة جدًّا من بعضها ومغمورة في غاز ما (الشكل 30 – 16). يتمّ وصل العديد من هذه الأسلاك مع الأرض، أمّا الأسلاك الأخرى التي بينها، فتوصل مع مصدر جهد مرتفع. عندما يمر جُسيم مشحون خلال الغاز ينتج منه أيونات. وتنساق الإلكترونات المتحررة نحو أقرب أسلاك الجهد المرتفع، مما يولد انهيارًا إلكترونيًّا تنتج منه نبضة كهربائية على ذلك السلك. تحدد مواضع الجُسيمات إلكترونيًّا بواسطة موضع السلك والزمن الذي تستغرقه النبضات للوصول إلى جهاز قراءتها الإلكتروني الموجود عند أطراف الأسلاك. ويعاد بناء مسارات هذه الجُسيمات إلكترونيًّا بواسطة الحاسوب الذي يمكنه رسم صورة للمسارات، كما هو موضح في الصورة الافتتاحية (للفصل 32).

ملخص

الفيزياء النووية عبارة عن دراسة للأنوية الذرية. تحتوي الأنوية على **بروتونات ونيوترونات**، وتعرف مجتمعة **بالنيوكلونات**. يمثل المجموعُ الكلي للنيوكلونات A **العددَ الكتلي** الذري للنواة. أما عدد البروتونات Z فيُسَمّى **العدد الذري**. عدد النيوترونات يساوي $A - Z$. **النظائر** عبارة عن أنوية لها العدد الذري نفسه، ولكن عدد النيوترونات فيها مختلف. بالنسبة إلى عنصر ما مثل X، فإنّ هذا النظير يمثّل كما يلي:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}.$$

يتناسب نصف القطر النووي تقريبًا مع $A^{\frac{1}{3}}$، مما يدل على أنّ الأنوية جميعها لها الكثافة نفسها تقريبًا. تعين الكتل النووية **بوحدات الكتلة الذرية الموحدة** (u)، حيث تعرف كتلة $^{12}_{6}\mathrm{C}$ (بما فيها إلكتروناتها الستة) بدقة على أنها تساوي $12.000000\,\mathrm{u}$، أو بدلالة ما يكافؤها بوحدات الطاقة (لأنّ $E = mc^2$).

حيث

$$1\,\mathrm{u} = 931.5\,\mathrm{MeV}/c^2 = 1.66 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

إنّ كتلة النواة المستقرة أقل من مجموع كتل النيوكلونات التي تكونها. والفرق في الكتلة (مضروبًا في c^2) يساوي **مجموع طاقة الترابط**. وهي عبارة عن الطاقة التي تحتاج إليها النواة حتى تتفكك إلى مكوناتها من النيوكلونات. يبلغ مقدار **متوسط طاقة الترابط لكلّ نيوكلون** حوالي $8\ \mathrm{MeV}$. وتقل بالنسبة للكتلة الصغيرة والأنوية ذات الكتل الكبيرة.
يحدث للأنوية غير المستقرة **اضمحلال إشعاعي**، حيث تتحول إلى أنوية أخرى مع انبعاث جُسيمات α, β أو γ.

جُسيم α عبارة عن نواة $^{4}_{2}He$. أمّا جُسيم β فهو إلكترون أو بوزترون؛ في حين أنّ أشعة γ عبارة عن فوتون ذي طاقة عالية. يصاحب اضمحلال β انبعاث **النيوترينو**. يُسَمّى تغير النواة الأم إلى نواة وليدة **بالتحوُّل الكيماوي للعناصر**. يحدث الاضمحلال الإشعاعيّ تلقائيًّا عندما تكون كتلة السكون لنواتجه أقل من كتلة النواة الأم فقط. تظهر الكتلة المفقودة على شكل طاقة حركية لنواتج الاضمحلال.

تتماسك الأنوية مع بعضها بواسطة **القوّة النووية القوية**. أمّا **القوة النووية الضعيفة** فتظهر في أثناء اضمحلال β. هاتان القوتان بالإضافة إلى قوة الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية تمثل أربعة أنواع معروفة من القوى.

الشحنة الكهربائية، كميّة التحرك الخطية والزاوية، الكتلة – الطاقة، **وعدد النيوكلون** يجب أن تكون جميعها **محافظة** في كلّ اضمحلال.

الاضمحلال الإشعاعيّ عبارة عن عملية إحصائية. يتناسب عدد الأنوية التي تضمحل (ΔN) خلال الفترة الزمنية Δt مع عدد الأنوية الأم الموجودة في النواة المشعة:

$$\Delta N = -\lambda N \, \Delta t \qquad (30\text{-}3)$$

تعني إشارة الناقص أنّ N تقلّ مع مرور الزمن. وتُسَمّى λ بـ **ثابت الاضمحلال**، وهو ميزة للنواة المعطاة.

يتناقص عدد الأنوية N المتبقية أسّيًّا بعد مرور الزمن t

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (4-30)$$

تمامًا كما هو الحال بالنسبة إلى **الشدة الإشعاعيّة** $\Delta N/\Delta t$:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} \qquad (5-30)$$

يعرف عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ على أنّه الزمن اللازم لاضمحلال نصف الأنوية الموجودة في عينة مشعة، كما في العلاقة

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (6-30)$$

يمكن استخدام الاضمحلال الإشعاعيّ في تحديد أعمار أجسام معينة.

[*يحدث اضمحلال ألفا بواسطة عملية تصفها الميكانيكا الكمية وتُسَمّى **تأثير النفق**].

[تشمل **كواشف** الجُسيمات **عدادات غايغر**، **ومواد وميضية** تتصل مع **أنابيب التضاعف الفوتونية**، **وكواشف أشباه الموصلات**. تشتمل الكواشف التي تُظهر أثر الجُسيم على: **مستحلب التصوير**، **والغرفة الفقاعية**، وحاليًّا تستخدم **غرف الانسياق نحو السلك**].

أسئلة

1. ما الشيء المشترك بين النظائر المختلفة لعنصر ما؟ كيف تختلف عن بعضها؟

2. ما العناصر التي تُمثَّل بالرمز X في كلّ مما يلي: (أ) $^{232}_{92}X$ ؟ (ب) $^{18}_{7}X$ ؟ (جـ) $^{1}_{1}X$ ؟ (د) $^{82}_{38}X$ ؟ (هـ) $^{247}_{97}X$ ؟

3. كم عدد كلّ من البروتونات والنيوترونات التي يمتلكها كلّ نظير في السؤال الثاني.

4. حدد النظير الذي يمتلك 88 نيوكلونا و 50 نيوترونا.

5. لماذا الكتل الذرية للعديد من العناصر (انظر إلى الجدول الدوري) ليست قريبة من الأعداد الصحيحة؟

6. كيف نعرف أنّ هناك شيئًا ما يُسَمّى القوة النووية القوية؟

7. ما وجه التشابه والاختلاف بين القوة النووية القوية والقوة الكهربائية؟

8. ما الدليل التجريبي الذي يؤيد النّشاط الإشعاعيّ على أنه عملية نووية؟

9. يعدّ النظير $^{64}_{29}Cu$ غير عادي من حيث إمكانية اضمحلاله بانبعاث γ، β^- أو β^+. ما هي النواة الناتجة من كلّ حالة؟

10. كم عدد النيوترونات التي تحتويها النواة الناتجة من اضمحلال نواة $^{238}_{92}U$؟

11. بقدر استطاعتك، صف بطرق عديدة الاختلاف بين إشعاعات α، و β، و γ.

12. ما العنصر الذي يتشكّل نتيجة للاضمحلال الإشعاعيّ لكلّ من: (أ) $^{24}_{11}Na\ (\beta^-)$؟ (ب) $^{22}_{11}Na\ (\beta^+)$؟ (جـ) $^{210}_{84}Po\ (\alpha)$؟ [مساعدة: انظر إلى الملحق B].

13. ما العنصر الذي يتشكل نتيجة لاضمحلال كلّ من: (أ) $^{32}_{15}P\ (\beta^-)$؟ (ب) $^{35}_{16}S\ (\beta^-)$ ؟ (جـ) $^{211}_{83}Bi\ (\alpha)$؟ [مساعدة: انظر إلى الملحق B].

14. املأ الفراغ بالجُسيم أو النواة المفقودة

(أ) $^{45}_{20}Ca \rightarrow\ ? + e^- + \bar{\nu}$

(ب) $^{58}_{29}Cu \rightarrow\ ? + \gamma$

(جـ) $^{46}_{24}Cr \rightarrow {}^{46}_{23}V +\ ?$

(د) $^{234}_{94}Pu \rightarrow\ ? + \alpha$

(هـ) $^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu +\ ?$

15. تبقى نواة الثوريوم الوليدة تمتلك 92 إلكترونًا تدور حولها مباشرة بعد اضمحلال نواة $^{238}_{92}U$ إلى $^{4}_{2}He + {}^{234}_{90}Th$. بما أنّ الثوريوم يحتفظ عادة بـ 90 إلكترونا فقط، ما الذي تفترض حدوثه بالنسبة للإلكترونين الإضافيين؟

16. عندما يحدث اضمحلال لنواة ما بانبعاث β^- أو β^+، ما الذي يحدث لمستويات الطاقة للإلكترونات الذرية؟ ما الذي يحدث لهذه الإلكترونات بعد الاضمحلال على الأرجح ؟

17. بشكل عام، تمتلك جُسيمات ألفا المنبعثة من نواة ما أحاديّة الطاقة جميعها الطاقة الحركية نفسها. في حين تمتلك جُسيمات بيتا المنبعثة من نواة ما طيفًا من الطاقات. اشرح الفرق بين هاتين الحالتين.

18. بشكل عام، هل تقع النظائر التي يحدث فيها الأسر الإلكتروني فوق خط الاستقرار المبين في (الشكل 30 – 2) أم تحته؟

19. هل يمكن أن يبعث الهيدروجين أو الديتيريوم جُسيم α؟ فسّر.

20. العديد من النظائر المشعة المصنّعة نادرة الوجود في الطبيعة. لماذا؟

21. إذا علمت أنّ عمر النصف لنظير ما شهر، فهل العينة المعطاة من هذا النظير تضمحل بالكامل بعد شهرين؟ إذا كانت الإجابة لا، فكم يبقى منها؟

22. ما سبب عدم استقرار أيّ من العناصر التي عددها الذري $Z > 92$؟

23. يضرب بروتون نواة $^{6}_{3}Li$. ينبعث نتيجة لذلك جُسيم α وجُسيم آخر. ما هو الجُسيم الآخر؟

24. هل يمكن استخدام $^{14}_{6}C$ لتحديد عمر جدران حجرية وألواح من حضارات قديمة؟ فسّر.

25. ينبعث إلكترون في كلّ من التحول الداخلي واضمحلال β. كيف يمكنك تحديد أيّ العمليتين قد حدثت؟

مسائل

30 – 1 الخصائص النووية

.1 (I) إذا كانت كتلة جُسيم باي ميزون $139\ \text{MeV}/c^2$. فكم تساوي بوحدات الكتلة الذرية؟

.2 (I) كم نصف القطر التقريبي لجُسيم ألفا ($^{4}_{2}\text{He}$)؟

.3 (II) كم كتلة السكون بوحدة MeV/c^2 لجُسيم α ظاهر للعيان؟

.4 (II) (أ) كم نصف القطر التقريبي لنواة $^{64}_{29}\text{Cu}$؟ (ب)تقريبًا. ما قيمة A للنواة التي نصف قطرها 3.9×10^{-15} m.

.5 (II) (أ) بين أنّ كثافة المادة النووية هي في الأساس نفسها للأنوية جميعها. (ب) كم سيكون نصف قطر الأرض إذا كان لها نفس كتلتها الحقيقية. ولكن كثافتها مثل تلك التي للأنوية؟ (جـ) كم سيكون نصف قطر نواة $^{238}_{92}\text{U}$ إذا كانت كثافتها هي كثافة الأرض نفسها؟

.6 (II) (أ) ما الجزء من كتلة ذرة الهيدروجين الذي يقع في نواتها؟ (ب) ما الجزء من حجم ذرة الهيدروجين الذي تحتله نواتها؟

.7 (II) تقريبًا. كم عدد النيوكلونات الموجودة في جسم كتلته 1.0 kg؟ ما تأثير المادة التي يتكون منها الجسم؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

.8 (III) كم كمية الطاقة التي يجب أن يمتلكها جُسيم α حتى يلامس سطح نواة $^{238}_{92}\text{U}$ فقط؟

30 - 2 طاقة الترابط

.9 (I) قدر طاقة الترابط الكلية لِـ $^{40}_{20}\text{Ca}$ مستعينًا (بالشكل 30 – 1).

.10 (I) استعن (بالشكل 30 – 1) لتقدير طاقة الترابط الكلية لكلّ ما يلي: (أ) $^{238}_{92}\text{U}$. (ب) $^{84}_{36}\text{Kr}$.

.11 (II) استعمل الملحق B لحساب طاقة الترابط للديتيريوم $^{2}_{1}\text{H}$.

.12 (II) احسب طاقة الترابط لكلّ نيوكلون لنواة $^{14}_{7}\text{N}$.

.13 (II) حدد طاقة الترابط للنيوترون الأخير في نواة $^{40}_{19}\text{K}$.

.14 (II) احسب طاقة الترابط الكلية وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون فيما يلي: (أ) $^{6}_{3}\text{Li}$. (ب) $^{208}_{82}\text{Pb}$. استعمل الملحق B.

.15 (II) قارن متوسّط طاقة الترابط لنيوكلون في نواة $^{23}_{11}\text{Na}$ مع تلك التي لنيوكلون في نواة $^{24}_{11}\text{Na}$.

.16 (III) ما كمية الطاقة اللازمة لنزع: (أ) بروتون؟ (ب) نيوترون من $^{16}_{8}\text{O}$؟ وضح الفرق في الإجابتين.

.17 (III) (أ) بين أنّ النواة $^{8}_{4}\text{Be}$ (كتلتها = 8.005305 u) غير مستقرة وتضمحل إلى جُسيمي α. (ب) هل $^{12}_{6}\text{C}$ مستقرّ بالنسبة للاضمحلال إلى ثلاثة جُسيمات α؟ وضح جوابك إنّ كان بالنفي أو الإيجاب.

30 – 3 إلى 30 – 7 الاضمحلال الإشعاعي

.18 (I) كم كمية الطاقة التي تتحرر عندما يضمحل التريتيوم $^{3}_{1}\text{H}$ بانبعاث جُسيم β^-؟

.19 (I) ما الطاقة الحركية القصوى للإلكترون المنبعث في اضمحلال β لنيوترون حرّ؟

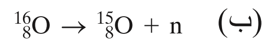
.20 (I) أثبت أنّ الاضمحلال $^{11}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{10}_{5}\text{B} + \text{p}$ غير ممكن الحدوث؛ لأنّ الطاقة لن تكون محفوظة.

.21 (II) إنّ عنصر $^{22}_{11}\text{Na}$ مشع.(أ) هل هو باعث لجُسيم β^- أم β^+؟ (ب) اكتب تفاعل الاضمحلال، وقدر الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β المنبعث.

.22 (II) اعط النتيجة الحسابية التي تبين أنّ كلّ اضمحلال فيما يلي ممكن الحدوث أم لا:



(أ) $^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + \text{n}$



(ب) $^{16}_{8}\text{O} \rightarrow {}^{15}_{8}\text{O} + \text{n}$



(جـ) $^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + \text{n}$

.23 (II) تُصدر نواة $^{238}_{92}\text{U}$ جُسيم α ذا الطاقة الحركية التي تساوي 4.20 MeV. (أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) ما الكتلة الذرية التقريبية (بوحدة u) لذرة النواة الوليدة؟ أهمل ارتداد النواة الوليدة.

.24 (II) ما الطاقة الحركية القصوى للإلكترون المنبعث من اضمحلال $^{23}_{10}\text{Ne}$ (كتلته = 22.9945 u) إلى $^{23}_{11}\text{Na}$ (كتلته = 22.9898 u)؟ ما أقل قيمة لطاقته؟ ما طاقة النيوترينو في كلّ حالة؟ أهمل ارتداد النواة الوليدة.

.25 (II) نواة كتلتها 238 u، بداية ساكنة، تصدر جُسيم α طاقته الحركية 5.0 MeV. ما الطاقة الحركية للنواة الوليدة المرتدة؟

.26 (II) ما الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β المنبعث خلال اضمحلال $^{60}_{27}\text{Co}$؟

.27 (II) تضمحل نواة $^{32}_{15}\text{P}$ بانبعاث إلكترون طاقته الحركية القصوى يمكن أن تكون في حدود 1.71 MeV. (أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) احسب الكتلة الذرية للنواة الوليدة (بوحدة u).

.28 (II) يمكن للنظير $^{218}_{84}\text{Po}$ أن يضمحلّ بانبعاث جُسيم α أو جُسيم β^- ، كم كمية الطاقة التي تتحرر في كلّ حالة؟ كتلة $^{218}_{84}\text{Po}$ تساوي 218.008965 u.

.29 (II) كم كمية الطاقة المتحررة عند أسر إلكترون بواسطة نواة البريليوم: $^{7}_{4}\text{Be} + {}^{0}_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{7}_{3}\text{Li} + \nu$

.30 (II) خرج فوتون طوله الموجي 1.00×10^{-13} m من ذرة. احسب طاقته ووضح سبب القول إنّه أشعة جاما من النواة أو فوتون من الذرة.

.31 (II) حدد الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β^+ الذي ينبعث عندما يضمحل $^{11}_{6}\text{C}$ إلى $^{11}_{5}\text{B}$. ما الطاقة القصوى التي يمكن أن يمتلكها النيوترينو؟ وما أقل طاقة له؟

.32 (II) كم طاقة الارتداد التي تحصل عليها نواة $^{40}_{19}\text{K}$ عندما تُصدر أشعة جاما طاقتها 1.46 MeV؟

.33 (III) ما طاقة جُسيم α الذي ينبعث خلال الاضمحلال $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha$؟ خذ بالحسبان ارتداد النواة الوليدة.

.34 (III) ينبعث جُسيم α عند اضمحلال $^{238}_{92}\text{U}$، بطاقة حركية تساوي 4.20 MeV. احسب الطاقة الحركية التي ترتد بها النواة الوليدة وقيمة -Q للاضمحلال.

.35 (III) بين أنّه عند اضمحلال نواة بانبعاث جُسيم β^+، فإنّ الطاقة الكلية المتحررة تساوي

$$(M_\text{P} - M_\text{D} - 2m_\text{e})c^2$$

حيث M_P و M_D كتلتا الذرات (متعادلة) الأم والوليدة على الترتيب؛ و m_e كتلة إلكترون أو بوزيترون.

30 – 8 إلى 30 – 11 عمر النصف، معدلات الاضمحلال، سلاسل الاضمحلال، تقدير العمر.

.36 (I) ينتج من مادة مشعة 1280 اضمحلالاً لكلّ دقيقة في وقت واحد. وبعد 4.6 h ينتج منها 320 اضمحلالاً لكلّ دقيقة. ما عمر النصف لهذه المادة؟

.37 (I) (أ) ما ثابت الاضمحلال لنواة $^{238}_{92}U$ علمًا أنّ عمر النصف لها يساوي $4.5 \times 10^{9}\,yr$؟ (ب) ما عمر النصف لنواة ثابت اضمحلالها $8.2 \times 10^{-5}\,s^{-1}$؟

.38 (I) ما الشدة الإشعاعية لعينة من $^{14}_{6}C$ تحتوي على 3.1×10^{20} نواة؟

.39 (I) ما الجزء المتبقي من عينة $^{68}_{32}Ge$ عمرها النصفي حوالي 9 أشهر بعد ثلاث سنوات؟

.40 (I) بالضبط، ما الجزء المتبقي من عينة بعد ستة أضعاف عمر النصف؟

.41 (II) كم عدد أنوية $^{238}_{92}U$ المتبقية في صخرة سجلت شدتها الإشعاعية 640 اضمحلالا/ ثانية؟

.42 (II) في سلسلة اضمحلال تصبح نواة $^{235}_{92}U$ نواة $^{207}_{82}Pb$. كم عدد جُسيمات α و β^- التي تنبعث في هذه السلسلة؟

.43 (II) يستعمل نظير اليود $^{131}_{53}I$ في المستشفيات لتشخيص عمل الغدّة الدرقية. إذا تناول مريضٌ مقدارَ $682\,\mu g$ فحدد الشدة الإشعاعية: (أ) مباشرة بعد تناول الجرعة. (ب) بعد ساعة من فحص الغدة الدرقية. (جـ) بعد ستة أشهر من تناول الجرعة. استعمل الملحق B.

.44 (II) يبلغ عمر النصف لنواة $^{124}_{55}Cs$ $30.8\,s$.(أ) إذا كان لدينا بداية $8.8\,\mu g$، فكم عدد أنوية Cs الموجودة؟ (ب) كم عدد الأنوية الموجودة بعد ثانيتين؟ (جـ) كم الشدة الإشعاعية عند هذه اللحظة؟ بعد مضي كم من الوقت تنخفض الشدة الإشعاعية إلى أقل من حوالي 1 لكلّ ثانية؟

.45 (II) احسب كتلة عينة نقية من $^{40}_{19}K$ بمعدل اضمحلال ابتدائي مقداره $2.0 \times 10^{5}\,s^{-1}$. علمًا بأنّ عمر النصف لنواة $^{40}_{19}K$ يساوي $1.28 \times 10^{9}\,yr$.

.46 (II) احسب الشدة الإشعاعية لعينة نقية من $^{32}_{15}P$ كتلتها $7.9\,\mu g$ $(T_{\frac{1}{2}} = 1.23 \times 10^{6}\,s)$.

.47 (II) الشدة الإشعاعية لعينة من $^{35}_{16}S\ (T_{\frac{1}{2}} = 7.55 \times 10^{6}\,s)$ تساوي 2.65×10^{5} اضمحلال لكلّ ثانية. ما كتلة هذه العينة؟

.48 (II) تحتوي عينة من على $^{233}_{92}U\ (T_{\frac{1}{2}} = 1.59 \times 10^{5}\,yr)$ 7.50×10^{19} نوية. (أ) ما ثابت الاضمحلال؟ (ب) كم اضمحلالا يحدث في كلّ دقيقة تقريبًا؟

.49 (II) تنخفض الشدة الإشعاعية لعينة ما بعامل 10 في 8.6 دقيقة. ما عمر النصف لهذه العينة؟

.50 (II) تحتوي عينة كربون نقية كتلتها 285 g على 1.3×10^{12} ذرة من $^{14}_{6}C$. كم عدد الاضمحلال الذي يحدث لكلّ ثانية؟

.51 (II) تضمحل عينة $^{40}_{19}K$ بمعدل 6.70×10^{2} decays/s ما كتلة هذه العينة؟

.52 (II) يُستخدم نظير الروبيديوم $^{87}_{37}Rb$ وهو باعث لجُسيم β وعمره النصفي $4.75 \times 10^{10}\,yr$، لتحديد عمر الصخور والمتحجرات. تحتوي الصخور على متحجرات حيوانات قديمة تحتوي على نسبة من $^{87}_{38}Sr$ إلى $^{87}_{37}Rb$ تساوي 0.0160. على افتراض أنّ $^{87}_{38}Sr$ لم يكن موجودًا عندما تشكلت الصخور، قدّر عمر هذه المتحجرات [مساعدة: استخدم المعادلة 30 – 3].

.53 (II) استخدم (الشكل 30 – 11) لحساب معدلات الاضمحلال النسبية لاضمحلال α في $^{218}_{84}Po$ و $^{214}_{84}Po$.

.54 (II) يضمحل $^{7}_{4}Be$ بعمر نصفي مقداره 53 يومًا تقريبًا. ينتج هذا النظير في الطبقات العلوية للغلاف الجوي، ثم يُصفى ويسقط على سطح الأرض. إذا تبين أنّ ورقة نبات تمتلك 450 decays/s من $^{7}_{4}Be$ (أ) كم الزمن الذي يجب أن ننتظره حتى ينخفض معدل الاضمحلال إلى 15 لكلّ ثانية؟ (ب) قدّر كتلة $^{7}_{4}Be$ الأولية الموجودة في ورقة النبات.

.55 (II) يحدث الاضمحلال الإشعاعيّ الطبيعي لنواتي $^{232}_{90}Th$ و $^{235}_{92}U$ في سلسلتين متعاقبتين. تعطى أول خمسة اضمحلالات للسلسلة الأولى كما يلي:

$$\alpha, \beta, \beta, \alpha, \alpha$$

والسلسلة الثانية:

$$\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha$$

حدّد الأنوية الوليدة المتوسطة الناتجة في كلّ حالة.

.56 (II) وجدت هراوة خشبيّة قديمة تحتوي على 290 g من الكربون وشدتها الإشعاعية 8.0 اضمحلالات لكلّ ثانية. حدد عمرها على فرض أنّ نسبة ذرات $^{14}C/^{12}C$ في الأشجار الحية تساوي حوالي 1.3×10^{-12}.

.57 (III) عند اللحظة $t = 0$، عينة نقية من أنوية مشعة تحتوي على N_0 نوية ثابت اضمحلالها λ. حدد صيغة رياضية لعدد الأنوية الوليدة N_D كدالة في الزمن؛ افرض أنّ النواة الوليدة مستقرّة، وأنّ $N_D = 0$ عند اللحظة $t = 0$.

مسائل عامة

.58 أيّ من النظائر المشعة للرصاص ينتج من تفاعل حيث تنخفض الشدة الإشعاعية المقيسة في عينة إلى 1.050% من الشدة الإشعاعية الأصلية في 4.00 h؟

.59 وجدت قطعة خشبيّة قديمة تحتوي على 6.0% فقط من $^{14}_{6}C$ الموجود في عينة حديثة من نوع الخشب نفسه. كم عمر هذه القطعة؟

.60 يحتوي نجم نيوتروني على نيوترونات بما يقارب الكثافة النووية. بالنسبة إلى نجم نيوتروني قطره 10 km، قدر: (أ) عدده الكتلي. (ب) كتلته بوحدة kg.(ج) تسارع الجاذبية على سطحه.

.61 يُسَمّى نظير الهيدروجين $^{3}_{1}H$ التريتيوم (لأنّه يحتوي على ثلاثة نيوكلونات) ويبلغ عمر النصف له 12.33 yr. يمكن استعمال هذا النظير في قياس عمر أجسام يصل عمرها إلى حوالي 100 yr. ويُنتج في الطبقات العليا للغلاف الجوي بواسطة الإشعاعات الكونية، ويصل إلى سطح الأرض عن طريق المطر. كتطبيق لذلك، حدد، على نحو تقريبي، عمر زجاجة نبيذ فيها إشعاعات $^{3}_{1}H$ تساوي حوالي $\frac{1}{10}$ من تلك الموجودة في النبيذ الجديد.

.62 تقترح بعض نظريات الجُسيمات الأولية أنّ البروتون غير مستقر وعمر النصف له $\geq 10^{32}\,yr$. كم الوقت المتوقع الذي يجب أن تنتظره حتى يضمحل بروتون في جسمك (افترض أنّ جسمك كلّه ماء)؟

.63 كم يجب أن تنتظر (بدلالة أعمار النصف) حتى تنخفض الشدة الإشعاعية لعينة إلى 100% من شدتها الإشعاعية الأصلية؟

.64 إذا كان نظير البوتاسيوم $^{40}_{19}\text{K}$ في لتر حليب يعطي 60 اضمحلالا في الثانية، فقدر كمية $^{40}_{19}\text{K}$ و $^{39}_{19}\text{K}$ الاعتيادي الموجودة في لتر حليب. استعمل الملحق B.

.65 (أ) في اضمحلال α لنواة $^{226}_{88}\text{Ra}$، بيّن أنّ النواة تحمل جزءًا من الطاقة المتوافرة للتفاعل يساوي $1/(1+\frac{1}{4}A_{\text{D}})$، حيث A_{D} يمثل العدد الكتلي للنواة الوليدة. (مساعدة: استعمل حفظ كمية التحرك بالإضافة إلى حفظ الطاقة). (ب) تقريبًا، كم النسبة المئوية من الطاقة المتوافرة التي يحملها جُسيم α في الحالة المذكورة أعلاه؟

.66 ينتج الاسترونشيوم $-$ 90 من الانشطار النووي لليورانيوم في كلّ من المفاعلات والقنابل الذرية. انظر إلى موقعه في الجدول الدوري لتعرف العناصر الأخرى التي قد تشبهه من الناحية الكيميائية، وبيّن خطر تناوله. يحتوي هذا العنصر على العديد من النيوترونات التي تضمحل بعمر نصف يبلغ حوالي 29 yr. ما الزمن اللازم انتظاره حتى تصل كمية $^{90}_{38}\text{Sr}$ الموجودة على سطح الأرض إلى 1% من مستواها الحالي، على فرض عدم تبعثر مواد جديدة على مقربة منه؟ اكتب تفاعل الاضمحلال بما في ذلك النواة الوليدة. النواة الوليدة مشعة، اكتب عملية اضمحلالها.

.67 تضمحل نواة $^{191}_{76}\text{Os}$ بانبعاث β^- طاقتها 0.14 MeV مصحوبة بإشعاعات جاما طاقتها 0.042 MeV و 0.129 MeV.
(أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) ارسم مخطط مستوى الطاقة مبينًا الحالات الأرضية للنواة الأم، والنواة الوليدة، وحالات التهيج للنواة الوليدة. لأيّ الحالات للنواة الوليدة يحدث اضمحلال $^{191}_{76}\text{Os}$ بانبعاث جُسيم β^-؟

.68 حدّد الشدة الإشعاعية لكلّ من: (أ) 1.0 g من $^{131}_{53}\text{I}$ $(T_{\frac{1}{2}} = 8.02 \text{ days})$ (ب) 1.0 g من $^{238}_{92}\text{U}$ $(T_{\frac{1}{2}} = 4.47 \times 10^9 \text{ yr})$.

.69 قدّر طاقة الترابط الكلية للنحاس، ثم قدّر الطاقة (بالجول) اللازمة لتفكك قطعة نقدية من النحاس كتلتها 3.0 g إلى النيوكلونات المكونة لها. [مساعدة: استعمل الشكل 30 $-$ 1].

.70 تعطي بعض الجداول الكتلة الفائضة، Δ التي تعرف على أنها $\Delta = M - A$، حيث A العدد الذري، و M الكتلة بوحدة u بدلا من الكتل الذرية للأنوية كما في الملحق B. حدد الكتلة الفائضة بوحدتي u و MeV/c^2 لكلّ من: (أ) $^{4}_{2}\text{He}$ (ب) $^{12}_{6}\text{C}$ (ج) $^{107}_{47}\text{Ag}$ (د) $^{235}_{92}\text{U}$.
(هـ) عند إلقاء نظرة سريعة على الملحق B، هل يمكنك عمل تعميم حول إشارة Δ كدالة في Z أو A.

.71 (أ) تحتوي عينة كربون طبيعية كتلتها 92 غرامًا على الجزء الاعتيادي $^{14}_{6}\text{C}$. قدر الزمن الذي تحتاج إليه قبل أن تبقى نواة واحدة فقط $^{14}_{6}\text{C}$. (ب) كيف تتغير الإجابة في (أ) إذا كانت كتلة العينة 280 غراما؟ ماذا يخبرنا هذا بخصوص حدود التأريخ بواسطة الكربون؟

.72 إذا كانت كتلة البروتون أقرب قليلا إلى كتلة النيوترون، فإنّ التفاعل التالي قد يكون ممكنًا حتى عند طاقات التصادم المنخفضة:

$$e^- + p \rightarrow n + \nu$$

لِمَ تعدّ هذه الحالة كارثية؟ ما النسبة المئوية التي يجب أن تزداد بها كتلة البروتون ليكون هذا التفاعل ممكنًا؟

.73 ما نسبة الطاقة الحركية لجُسيم ألفا إلى تلك التي لجُسيم بيتا إذا عمل كلّ منهما مسارات لها نصف قطر الانحناء نفسه في مجال مغناطيسي يوجه عموديًّا على مسارات الجُسيمات؟

.74 عينة سمريوم طبيعية كتلتها 1.00 g تصدر جُسيمات α بمعدل 120 s^{-1} بسبب وجود $^{147}_{62}\text{Sm}$. فإذا كانت الوفرة الطبيعية لهذا العنصر 15%، فاحسب عمر النصف لعملية الاضمحلال هذه.

.75 يتمثل اليورانيوم الطبيعي كلّه تقريبًا في $^{238}_{92}\text{U}$، وعمره النصفي $4.468 \times 10^9 \text{ yr}$. أما الجزء المتبقي فيتمثل أغلبه في $^{235}_{92}\text{U}$، وعمره النصفي $7.038 \times 10^8 \text{ yr}$. تحتوي عينة في الوقت الحاضر على 0.72% من $^{235}_{92}\text{U}$. (أ) كم كانت هذه النسبة المئوية قبل مليار سنة؟ (ب) كم النسبة المئوية من العينة ستكون لـ $^{235}_{92}\text{U}$ في 100 مليون سنة؟

.76 يحتوي الموز العادي على 400 *mg* من البوتاس، جزء صغير منه هو النظير المشع $^{40}_{19}\text{K}$ (انظر إلى الملحق ب). قدر الشدة الإشعاعية في الموز بسبب $^{40}_{19}\text{K}$.

.77 الحدّ العملي للتأريخ بواسطة الكربون حوالي 60,000 سنة. إذا احتوت عظمة على 1.0 *kg* من الكربون ونفق الحيوان قبل 60,000 سنة، فما الشدة الإشعاعية في الوقت الحاضر؟

.78 يمكن تصنيف السلاسل الإشعاعية كتلك التي في (الشكل 30 $-$ 11) إلى أربع عائلات اعتمادًا على الأعداد الكتلية فيما إذا كان شكلها $4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$ حيث n عدد صحيح. برّر صحة هذه العبارة، وأثبت أنّ الأنوية الوليدة جميعها لأيّ نواة في أيّ عائلة سوف تكون في العائلة نفسها.

إجابات التمارين

أ: 0.0421 u

ب: 7.98 MeV/nucleon.

جـ: $1.37 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$

د: لا: $(\frac{1}{2})(\frac{1}{2}) = \frac{1}{4}$ سوف يبقى.



في الصورة، تقنيّون ينظرون إلى صورة رنين مغناطيسي (MRI) لمقاطع من خلال جسم مريض. إنّ MRI واحد من أكثر أنواع التصوير الطبي قوة، ويعتمد على مبادئ الفيزياء، ويُستخدم من قبل الأطباء لتشخيص الأمراض.

نفتتح هذا الفصل بالموضوعات الفيزيائية الأساسية والمهمة التي تشمل التفاعلات النووية، والانشطار النوويّ، والاندماج النوويّ، وكيفية الحصول على الطاقة النووية. ومن ثمَّ سنختبر الموضوعات الصحية المرتبطة بالإشعاع كقياس الجرعة الإشعاعية، والزرع الإشعاعيّ، والتصوير بواسطة MRI، و PET، و SPET.

الفصل 31

الطاقة النوويَّة: تأثيرات الإشعاع واستخداماته

سنكمل دراستنا للفيزياء النووية بهذا الفصل، حيث نبدأ بمناقشة التفاعلات النووية، ثم اختبار الطاقة الكبيرة والمهمة الناتجة من الانشطار والاندماج النوويين. أما باقي الفصل، فسيركز على تأثيرات الإشعاعات النووية عندما تمرّ في المواد وبشكل جزئي في المواد البيولوجية، ثم كيفية استخدام الإشعاع طبيًّا في التشخيص والعلاج، وكذلك التطورات الحديثة لتقنيات التصوير.

1-31 التفاعلات النووية وتحوّلات العناصر

عندما تطلق نواة جُسيمات α أو β، فإنّ النواة الناتجة (الوليدة) تختلف عن النواة الأصلية (الأم) في عملية تدعى التحوّل (**transmutation**). وتظهر هذه العملية أيضًا في التفاعلات النووية. يظهر التفاعل النووي عندما تصطدم نواة معينة بنواة أخرى، أو بجسيم بسيط كأشعة γ، أو بنيوترون بحيث يحدث تفاعل بينهما. يعدّ إيرنست رذرفورد أول من كتب تقريرًا عن التفاعلات النووية، حيث لاحظ في عام 1919 أنّ بعض جُسيمات ألفا تُمتَص، وتُنتِج بروتونات عندما تخترق غاز النيتروجين، واستنتج من هذا أنّ أنوية النيتروجين تتحول إلى أنوية أكسجين من خلال التفاعل



$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

حيث $^{4}_{2}\mathrm{He}$ جسي α، و$^{1}_{1}\mathrm{H}$ هو البروتون.

لقدِ اكْتُشِفَ عددٌ كبيرٌ جدًّا من التفاعلات النووية حتى الآن. وفي الواقع فإنّ كثيرًا من النظائر المشعة المستخدمة في المختبرات تصنع بواسطة التفاعلات النووية التي يمكن إنتاجها في المختبرات، ولكنّها موجودة في الطبيعة أيضًا. وقد رأينا في (الفصل 30) مثالا على ذلك؛ $^{14}_{6}C$ يصنع بشكل مستمر في الغلاف الجوي من خلال التفاعل* $n + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + p$.

ويمكن كتابة هذه التفاعلات بشكل مختصر $n + ^{137}_{56}Ba \rightarrow ? + \gamma$

التمرين أ: حدد الذرة الناتجة في التفاعل $n + ^{137}_{56}Ba \rightarrow ? + \gamma$.

في أي تفاعل نووي، يتم حفظ الشحنة وكتل الأنوية. وعادة تكون قوانين الحفظ هذه مفيدة كما يبين المثال التالي.

المثال المفاهيمي 1-31 تفاعل الديتيريوم

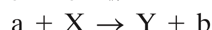
الديتيريوم

عند اصطدام النيوترون بنواة $^{16}_{8}O$، ينتج الديتيريوم (أو الديوترون) من هذا التفاعل (الديوترون أو الديتيريوم هو أحد نظائر الهيدروجين، ويحتوي بروتونًا واحدًا ونيوترونًا واحدًا $^{2}_{1}H$، و يشار إليه في بعض الأحيان بالرمز d أو D).

ما هي النواة التي تنتج من هذا التفاعل؟

الإجابة: لدينا التفاعل $n + ^{16}_{8}O \rightarrow ? + ^{2}_{1}H$. العدد الكلي في البداية للنيوكليونات $17 = 16 + 1$. والشحنة الكلية $8 = 8 + 0$. وهذه الأرقام يجب أن تكون نفسها في النواتج، والنواة الناتجة يجب أن يكون لها $Z = 7$، و $A = 15$. ومن الجدول الدوري، نجد أنها نواة نيتروجين، $^{15}_{7}N$.

إنّ الطاقة وكمية الحركة (الزخم) يجب أن يكونا محفوظين أيضًا في التفاعلات النووية. ويمكن استعمالهما لتحديد إمكانية حصول التفاعل أو عدم حصوله. فعلى سبيل المثال، إذا كانت الكتلة الكلية في النواتج أقلّ من الكتلة الكلية للمتفاعلات، فهذا النقصان في الكتلة (تذكر أنّ $\Delta E = \Delta m c^2$) يتحول إلى طاقة حركية للجُسيمات الناتجة، أما إذا كانت كتلة النواتج أكبر من كتلة المتفاعلات، فإنّ هذا التفاعل لا يمكن أن يحدث إلا إذا امتلكت الجُسيمات المقذوفة طاقة حركية كافية. ويمكن تمثيل التفاعل النووي بشكل عام بالصورة الآتية:



$$a + X \rightarrow Y + b$$

حيث a هو الجسيم المقذوف (ويمكن أن يكون نواة صغيرة) الذي يصطدم بالنواة X لإنتاج النواة Y والجُسيم b (في العادة p, n, α, γ).

القيمة (Q)

نُعرّف طاقة التفاعل أو القيمة (Q) $Q - value$ بدلالة الكتل المعطاة كما يلي:

$$Q = (M_a + M_X - M_b - M_Y)c^2 \qquad \textbf{(1-31)}$$

وهذه جميعها كتل ساكنة ولأشعة γ تكون $M = 0$. وبسبب أنّ الطاقة محفوظة، فإنّ Q تساوي التغير في الطاقة الحركية (النهائية ناقص الابتدائية):

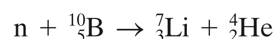
حفظ الطاقة

$$Q = KE_b + KE_Y - KE_a - KE_X \qquad \textbf{(2-31)}$$

في كثير من التفاعلات، $KE_X = 0$ حيث تكون الذرة الهدف X ساكنة قبل أن يصطدم بها الجسيم a.

إذا كانت $Q > 0$، فإنّ التفاعل يكون طاردًا للطاقة $(exothermic\ or\ exoergic)$ وتنتج طاقة من التفاعل، حيث تكون الطاقة الحركية للنواتج أكبر منها للمتفاعلات، إما إذا كانت Q سالبة آي $(Q < 0)$، فإنّ التفاعل يكون ماصًّا للطاقة $(endothermic\ or\ endoergic)$ وفي هذه الحالة تكون الطاقة الحركية النهائية أقلّ من الطاقة الحركية الابتدائية. لذا، نحتاج إلى طاقة كي يحدث التفاعل. تأتي الطاقة الداخلة من الطاقة الحركية للجُسيمات المتصادمة (a و X).

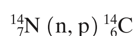
المثال 2-31 تفاعل النيوترون البطيء: التفاعل النوويّ



$$n + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

يلاحظ حدوثه حتى لو كان النيوترون بطيئًا جدًّا عند اصطدامه بذرة البورون $(M_n = 1.0087\ u)$. في هذا التفاعل، إذا اعتبرنا أنّ $KE_n \approx 0$، وكتلة نواة الهيليوم الناتجة $M_{He} = 4.0026\ u$، وتمتلك سرعة مقدارها $9.30 \times 10^6\ m/s$. احسب ما يلي: (أ) الطاقة الحركية لنواة الليثيوم $(M_{Li} = 7.0160\ u)$. (ب) القيمة Q لهذا التفاعل.

* تكتب التفاعلات النووية أحيانًا باختصار على النحو: $n + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + p$ وتكتب:



$$^{14}_{7}N\ (n, p)\ ^{14}_{6}C$$

الرموز خارج القوسين إلى اليسار واليمين تمثل القوى الداخلة والخارجة من التفاعل بالتركيب، والرموز داخل القوسين تمثل الجسيم المقذوف (الأول) والجسيم المنطلق (الثاني).

النّهج: حيث إنّ كلاً من البروتون والنيوترون ساكن، فإنّ كمية الحركة قبل التفاعل تساوي صفرًا، وحيث إنّ كمية الحركة محفوظة، فيجب أن تساوي صفرًا أيضًا بعد التفاعل. لذا، يكون

$$M_{Li} v_{Li} = M_{He} v_{He}$$

نجد قيمة v_{Li} ونعوضها في معادلة الطاقة الحركية.

الحل: (أ) نستطيع استخدام المعادلة الكلاسيكية للطاقة الحركية بخطأ قليل بدلًا من الصيغة النسبيّة؛ لأنّ $v_{He} = 9.30 \times 10^6\,m/s$ ليست قريبة من سرعة الضوء c، وستكون v_{Li} أقلّ؛ لأنّ $M_{Li} > M_{He}$. إذن، يمكن أن نكتب

$$\text{KE}_{Li} = \frac{1}{2} M_{Li} v_{Li}^2 = \frac{1}{2} M_{Li}\left(\frac{M_{He} v_{He}}{M_{Li}}\right)^2 = \frac{M_{He}^2 v_{He}^2}{2M_{Li}}$$

وبالتعويض بالأرقام مع وضع الكتلة بوحدة kg بدلا من u، وتذكُّر أنّ $1\,MeV = 1.60 \times 10^{-13}\,J$ فإننا نحصل على

$$\text{KE}_{Li} = \frac{(4.0026\,u)^2(1.66 \times 10^{-27}\,kg/u)^2(9.30 \times 10^6\,m/s)^2}{2(7.0160\,u)(1.66 \times 10^{-27}\,kg/u)}$$

$$= 1.64 \times 10^{-13}\,J = 1.02\,MeV$$

(ب) لدينا $\text{KE}_a = \text{KE}_X = 0$، وبالتعويض في (المعادلة 31 - 2) سنحصل على $Q = \text{KE}_{Li} + \text{KE}_{He}$ حيث

$$\text{KE}_{He} = \tfrac{1}{2} M_{He} v_{He}^2 = \tfrac{1}{2}(4.0026\,u)(1.66 \times 10^{-27}\,kg/u)(9.30 \times 10^6\,m/s)^2$$

$$= 2.87 \times 10^{-13}\,J = 1.80\,MeV$$

وبالتالي تكون $Q = 1.02\,MeV + 1.80\,MeV = 2.82\,MeV$.

المثال 31-3 هل يمكن حدوث التفاعل؟

هل يمكن للتفاعل $p + {}^{13}_{6}C \rightarrow {}^{13}_{7}N + n$ أن يحدث إذا قذفت نواة الكربون ${}^{13}_{6}C$ ببروتون طاقته 2.0-MeV؟

النّهج: (أ) سوف يحدث التفاعل إذا كان طاردًا للحرارة ($Q > 0$). وحتى لو كانت $Q < 0$ فيمكن أن يحدث هذا التفاعل إذا كانت كمية الحركة والطاقة الحركية الداخلة كافية. في البداية، سنحسب Q من الفرق بين الكتل الابتدائية والنهائية، باستخدام (المعادلة 13 - 1)، وبتعويض قيم الكتل من الملحق B:

الحل: مجموع الكتل قبل وبعد التفاعل هي كما يلي:

قبل التفاعل	بعد التفاعل
$M({}^{13}_{6}C) = 13.003355$	$M({}^{13}_{7}N) = 13.005739$
$M({}^{1}_{1}H) = 1.007825$	$M(n) = 1.008665$
14.011180	14.014404

(يجب أن نستخدم كتلة ${}^{1}_{1}H$ بدلا من كتلة البروتون المجردة؛ لأنّ الكتل ${}^{13}_{6}C$ و ${}^{13}_{7}N$ تحتوي على إلكترونات. لذا، يجب أن يكون لدينا عدد متساوٍ من كتل الإلكترونات في طرفي المعادلة بحيث لا يكون هنالك فناء أو استحداث لها). وتزداد كتلة الناتج بمقدار

$$(14.014404 - 14.011180)u = 0.003224\,u \times 931.5\,MeV/u = 3.00\,MeV$$

وتكون $Q = -3.00\,MeV$، والتفاعل ماصّ للطاقة. وهذا التفاعل يحتاج إلى طاقة، والبروتونات التي طاقتها 2.0 MeV ليست كافيةً لحدوث التفاعل.

طاقة العتبة

ملحوظة: يجب أن يمتلك البروتون في (المثال 31 − 3) طاقة حركية أكبر نوعًا ما من 3.00 MeV لجعل هذا التفاعل يحدث. إنّ الطاقة 3.00 MeV ستكون كافية لحفظ الطاقة، ولكن البروتون في هذه الطاقة سوف ينتج ${}^{13}_{7}N$ ونيوترون (n) دون طاقة حركية ولا كمية تحرك. وحيث إنّ البروتون الذي طاقته 3.0-MeV له كمية حركة، فإنّ قانون حفظ كمية التحرك سوف ينتهك. توضّح لنا الحسابات باستخدام قانوني حفظ الطاقة وكمية التحرك (الزخم) كما في (المثال 30 − 7 و 31 − 2) أنّ أقلّ طاقة للبروتون والتي تُسَمّى طاقة العتبة (**threshold energy**) تساوي 3.23 MeV في حالتنا هذه.

لقد كان للتحولات الصناعية للعناصر قفزات كبيرة إلى الأمام في ثلاثينيات القرن الماضي، عندما قام إنريكو فيرمي بالتحقق من أنّ النيوترونات هي أكثر قذيفة فاعلة لإحداث التفاعلات النووية وبشكل جزئي لإنتاج عناصر جديدة؛ لأنّ النيوترونات غير مشحونة، ولا تتنافر مع الأنوية موجبة الشحنة كما يحدث في حالة البروتونات أو جُسيمات ألفا، وهنا تكون احتمالية وصول النيوترون إلى النواة،* وعمل تفاعل نووي أكبر من الجُسيمات المشحونة وبشكل جزئي عند الطاقات المنخفضة. بين عامي 1934 و 1936، قام فيرمي مع زملائه بإنتاج الكثير من النظائر التي لم تكن معروفة قبل ذلك بقذف عناصر عديدة بالنيوترونات. تحقّق فيرمي بأنه لو قذف أثقل عنصر معروف آنذاك وهو اليورانيوم بالنيوترونات، فمن المتوقع إنتاج عناصر جديدة لها عدد كتلي أكبر من العدد الكتلي لليورانيوم. وبعد عدة سنوات من العمل الجاد، تمّ إنتاج عنصرين من العناصر المتوقع وجودها، هما النيبتونيوم ($Z = 93$) والبلاتونيوم ($Z = 94$). ولكن التأكد التام من أنّ هذه العناصر المتحولة يمكن إنتاجها لم يتحقق إلا بعد عدّة سنوات في جامعة كاليفورنيا، بيركلي. التفاعلات موضحة في (الشكل 31 – 1).

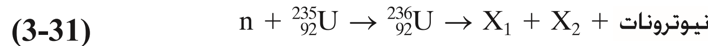
وبعد زمن قليل، تبيّن أنّ ما شاهده فيرمي حقيقة عند قذف اليورانيوم كان عملية غريبة، تلك العملية التي اتّجهت للعب قواعد استثنائية في العالم وعلى نطاق واسع. وسنناقش هذا في (البند 31 – 2).

2-31 الانشطار النووي؛ المفاعلات النووية

في عام 1938، قام العالمان الألمانيان أوتوهان وفريتزستراشمان باكتشاف رائع. وبتتبع عمل فيرمي، وجدا أنّ اليورانيوم عند قذفه بالنيوترونات فإنه ينتج أحيانًا أنوية أصغر، وذات حجم يساوي نصف حجم ذرة اليورانيوم الأصلية تقريبًا. قام كلّ من ليز ميتنر وأوتو فريش وهما لاجئان من ألمانيا النازية يعملان في إسكندنافيا بالتحقق مما حدث: تنشطر نواة اليورانيوم بعد امتصاصها للنيوترون إلى جزأين متساويين تقريبًا، وقد كان هذا مفاجئًا في الوقت الذي كانت فيه التفاعلات النووية المعروفة تستلزم خروج شظايا صغيرة (مثل n، أو p، أو α) من النواة.

الانشطار النووي والتفاعل المتسلسل

سُمِّيَتْ هذه الظاهرة الجديدة بالانشطار النووي **(nuclear fission)**؛ بسبب تشابهها مع الانشطار البيولوجي (انشطار الخلية). ويظهر الانشطار النووي بسهولة أكثر في $^{235}_{92}U$ منه في نواة اليورانيوم المعروفة $^{238}_{92}U$. العملية يمكن تخيلها بتشبيه نواة اليورانيوم بقطرة السائل. حسب نموذج قطرة السائل هذا، فإنّ النيوترون الممتص من نواة $^{235}_{92}U$ يعطي النواة طاقة داخلية إضافية (مثل تسخين قطرة الماء). هذه الحالة المتوسطة، أو النواة المركبة، هي $^{236}_{92}U$ (وذلك بسبب امتصاصها النيوترون) تظهر الطاقة الإضافية لهذه النواة التي تكون في حالة مستثارة على شكل حركة في النيوكليونات المنفصلة، والتي تجعل النواة تأخذ شكلًا مستطيلًا غير عادي، (الشكل 31 – 2). وعندما تستطيل النواة (في هذا النموذج) إلى الصورة الموضحة في (الشكل 31 – 2 جـ)، فإنّ جذب الطرفين من خلال القوة النووية قصيرة المدى يضعف كثيرًا بسبب زيادة المسافة الفاصلة، وتصبح قوة التنافر الكهربائية مسيطرة وتنشطر النواة إلى جزأين (الشكل 31 – 2د). النواتان الناتجتان X_1 و X_2 تسميان النواتين المتولدتين من الانشطار **(fission fragments)**. وفي هذه العملية ينتج عدد من النيوترونات (في العادة 2 أو 3). ويمكن كتابة هذا التفاعل كما يلي:



$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow X_1 + X_2 + \text{نيوترونات} \quad \textbf{(3-31)}$$

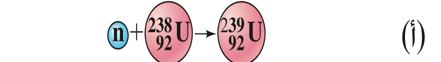
تظهر النواة الناتجة $^{236}_{92}U$ لفترة زمنية أقلّ من 10^{-12} s. وبالتالي تظهر العملية بسرعة كبيرة. تكون نسبة كتلتي النواتين المتولدتين من الانشطار مقارنة بنواة اليورانيوم الأصلية 40%، و 60% وليست مناصفة تمامًا. والشكل النموذجي للانشطار النووي هو



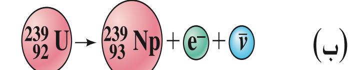
$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3n \quad \textbf{(4-31)}$$

وقد ظهرت أيضًا عدة أشكال أخرى لهذه التفاعلات.

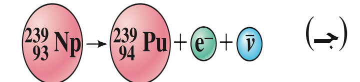
* وهذه دقائق مشحونة بشحنة موجبة. ونادرًا ما تحدث الإلكترونات تفاعلات نووية لأنّها لا تستطيع اختراق القوى النووية القوية.

(أ)


الحصول على النيوترون بواسطة $^{238}_{92}U$

(ب)


$^{239}_{92}U$ يضمحل عن طريق β لإنتاج النبتونيوم-239

(جـ)


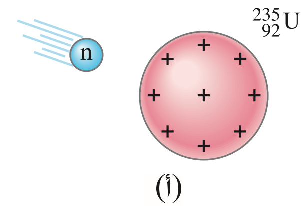
يضمحل $^{239}_{93}Np$ نفسه عن طريق إشعاع β لإنتاج البلوتونيوم– 239

الشكل 31 – 1

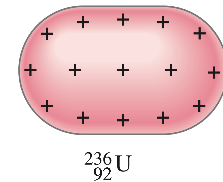
إنتاج النبتونيوم والبلوتونيوم في سلسلة من التفاعلات الناتجة من قذف $^{238}_{92}U$ بالنيوترونات.

الشكل 31 – 2

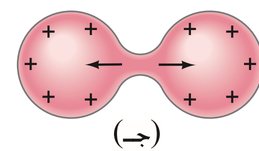
انشطار نواة $^{235}_{92}U$ بعد اقتناص نيوترون حسب نموذج قطرة السائل.

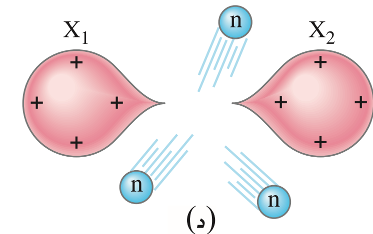


(أ)



مُثارة (ب)


(جـ)



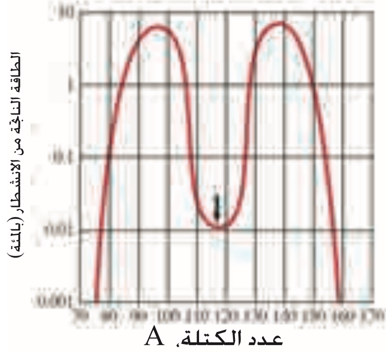
(د)

المثال المفاهيمي 4-31 إيجاد عدد النيوكليونات

عَرِّف العنصر X في التفاعل الانشطاري التالي: $n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{93}_{38}Sr + 2n$.

الإجابة: عدد النيوكليونات محفوظ (البند 30 − 7). عدد النيوكليونات 235 في نواة اليورانيوم بالإضافة إلى النيوترون القذيفة يساوي $236 = 1 + 235$، ويجب أن يكون لدينا 236 نيوكليونا بعد التفاعل. نواة Sr تمتلك 93 نيوكليونًا، وبالإضافة للنيوترونين الناتجين، فإنها تمتلك 95 نيوكليونًا. أمّا X فيكون لها $A = 236 - 95 = 141$. كما أنّ الشحنة الكهربائية تكون محفوظة أيضًا، وقبل التفاعل، تكون الشحنة الكلية $92e$. ولكن بعد التفاعل، تكون الشحنة الكلية $(Z + 38)e$ وهذه يجب أن تساوي $92e$. لذلك، يكون $Z = 92 - 38 = 54$. إنّ العنصر الذي له $Z = 54$ (انظر الملحق B أو الجدول الدوري) هو الزينون Xe، ويكون الناتج هو النظير ${}^{141}_{54}Xe$.

التمرين ب: في التفاعل الانشطاري نيوترونات + $n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{137}_{53}I + {}^{96}_{39}Y$ كم عدد النيوترونات الناتجة؟



الشكل 31 − 3 التوزيع الكتلي للأنوية الناتجة من الانشطار $n + {}^{235}_{92}U$. يدل السهم الصغير على الكتل المتساوية للنواتج $(\frac{1}{2} \times (236 - 2) = 117)$ لاحظ أنّ التدريج العمودي لوغاريتمي

يرينا (الشكل 31 − 3) توزيع الأجزاء الانشطارية حسب الكتلة. لاحظ أنّه نادرًا (حوالي 1 من 10^4) ما تكون نواتج الانشطار لها كتل متساوية (السهم الصغير في الشكل 31 − 3).

تنتج كمية طاقة هائلة من التفاعل الانشطاري؛ لأنّ كتلة النواة ${}^{235}_{92}U$ أكبر من الكتلة الكلية للأجزاء الناتجة من الانشطار بالإضافة إلى كتلة النيوترونات الناتجة، ويمكن أن نرى هذا من منحنى طاقة الربط لكلّ نيوكليون الموضح في (الشكل 30 − 1). طاقة الربط لكلّ نيوكليون لليورانيوم تساوي 7.6 MeV/nucleon تقريبًا. ولكن للأجزاء الناتجة التي يكون لها كتل متوسطة (في المقطع المركزي للرسم، $A \approx 100$) فإنّ معدل طاقة الربط لكلّ نيوكليون تساوي 8.5 MeV/nucleon تقريبًا، حيث تكون الأنوية الناتجة مترابطة أكثر، ويكون لها كتل أقلّ.

إنّ الفرق في الكتلة أو الطاقة بين ذرة اليورانيوم الأصلية والأنوية الناتجة من التفاعل يساوي تقريبًا $8.5 - 7.6 = 0.9$ MeV لكلّ نيوكليون. وحيث إنه ينتج 236 نيوكليونا خلال كلّ انشطار، فإنّ الطاقة الكلية الناتجة من كلّ انشطار تساوي

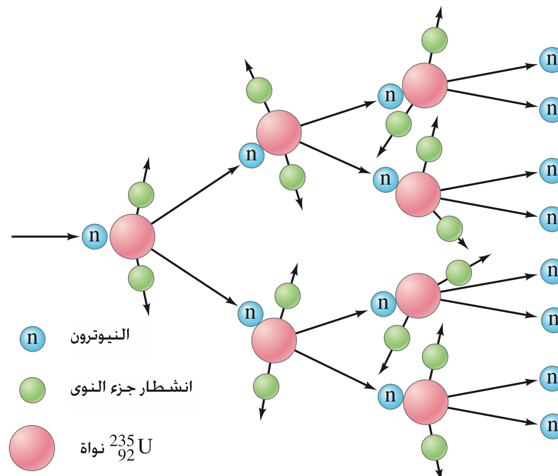
الطاقة الناتجة من كلّ انشطار.

$$(0.9\ \text{MeV/nucleon})(236\ \text{nucleons}) \approx 200\ \text{MeV} \qquad \textbf{(31 – 5)}$$

وهذه كمية طاقة ضخمة لحدث نووي واحد. في المستوى العملي، الطاقة الناتجة من انشطار واحد هي صغيرة جدّا طبعًا ولكن، إذا حدثت انشطارات كثيرة مشابهة في زمن قصير، فيمكن حينها توفير كمية ضخمة من الطاقة في المستوى الجاهري. كثير من الفيزيائيين، بمن فيهم فيرمي، يدركون أنّ النيوترونات الناتجة في كلّ انشطار (المعادلتان 31 - 3 و 31 - 4) تستخدم لإنتاج ما يُسَمّى بالتفاعل المتسلسل. في البداية، يسبب النيوترون انشطارًا واحدًا لنواة اليورانيوم فينتج نيوترونين أو ثلاثة قادرة على إنتاج انشطارات إضافية. وتتكرر هذه العملية كما هو واضح في (الشكل 31 − 4).

إنّ التفاعل المتسلسل المدعوم ذاتيًا وجد أنه ممكن الحدوث من الناحية العملية. ويمكن الحصول على الطاقة الهائلة الناتجة في الانشطار النووي على مستوى أكبر، وذلك بعدما أثبت فيرمي وزملاؤه (في جامعة شيكاغو) إمكانية هذا من خلال بناء أول مفاعل نووي عام 1942 (الشكل 31 − 5).

الشكل 31 − 4 التفاعل المتسلسل





الشكل 31 – 5 رسم ملوّن لأول مفاعل نووي بناه فيرمي تحت المدرج المسقوف لحقل ستاج في جامعة شيكاغو (لا توجد صورة للمفاعل لأنه يعدّ سرًّا عسكريا). استخدم اليورانيوم الطبيعي مع الجرافيت كمهدئ. في الثاني من كانون الأول عام 1942 سحب فيرمي قضبان التحكم المكونة من الكادميوم وبدأ المفاعل بالعمل. أول إثبات شخصي للتفاعل المستلسل بُلّغ لواشنطن بالهاتف من قِبَلِ آرثركومبتون الذي شهد الحدث وسجل: (الربان الايطالي هبط الآن في العالم الجديد). جاري شيهان، (ولادة العصر الذري) شيكاجو (الينويز)، 1942.

المفاعلات النووية

مبدأ باسكال

هناك عدة مشاكل تواجهنا عند عمل مفاعل الانشطار النووي. أولها، أنّ احتمالية امتصاص نواة $^{235}_{92}U$ للنيوترونات البطيئة تكون كبيرة. ولكن النيوترونات التي تنتج من الانشطار ونحتاج إليها لاستمرارية التفاعل المتسلسل تتحرك بسرعة كبيرة. يجب استخدام مهدئ مادة تُسَمّى **المهدئ** لتخفيض سرعة النيوترونات. إنّ أكثر مهدئ فاعل يجب أنّ يتكون من ذرات كتلتها قريبة أكثر ما يمكن من كتلة النيوترونات (للتأكد من صحة هذا الكلام: ارجع إلى (الفصل 7) الذي يخبرنا بأنّ كرة البليادرو التي تصطدم مع كرة أخرى ساكنة مساوية لها بالكتلة يمكن أن تتوقف باصطدام واحد، ولكن عندما تصدم كرة البليادرو بجسم ثقيل، فإنها ترتد دون تغيير سرعتها تقريبًا). إنّ أفضل مهدئ هو الذي يحتوي ذرات $^{1}_{1}H$. ومن المؤكد أنّ $^{1}_{1}H$ يؤدي إلى امتصاص النيوترونات، ولكن نظير الهيدروجين المسمى الديتيريوم $^{2}_{1}H$ لا يمتص معظم النيوترونات، لذا فإنّه يُعَدّ مهدئًا مثاليًا. كلّ من $^{1}_{1}H$ أو $^{2}_{1}H$ يستخدم على صورة ماء. وفي الحالة الأخيرة، فإنّه يكون ماءً ثقيلا، وفيه تحّل ذرات الديتيريوم محلّ ذرات الهيدروجين. وهنالك مهدئ آخر شائع الاستخدام هو الجرافيت الذي يتكون من ذرات $^{12}_{6}C$.

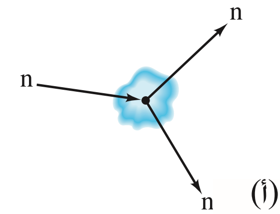
أما المشكلة الثانية، فهي أنّ النيوترونات الناجّة في انشطار واحد تُمتَصُّ وتنتج تفاعلات نووية أخرى مع ذرات أخرى في المفاعل، بالإضافة إلى إنتاج انشطارات أخرى. في مفاعل الماء الخفيف، تمتص أنوية $^{1}_{1}H$ النيوترونات وكذلك أنوية $^{238}_{92}U$ لإنتاج $^{239}_{92}U$ في التفاعل $n + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{239}_{92}U + \gamma$. يحتوي اليورانيوم الموجود في الطبيعة* على 99.3% من أنوية $^{238}_{92}U$، و 0.7% فقط من أنوية $^{235}_{92}U$ القابل للانشطار. ولزيادة احتمالية انشطار $^{235}_{92}U$؛ يجب إغناء اليورانيوم الطبيعي لزيادة نسبة $^{235}_{92}U$ باستخدام عملية تشبه الانتشار أو الطرد المركزي. إنّ عملية الإغناء هذه غير ضرورية عادةً في المفاعلات التي تستخدم الماء الثقيل كمهدئ؛ لأنّ الماء الثقيل لا يمتص النيوترونات.

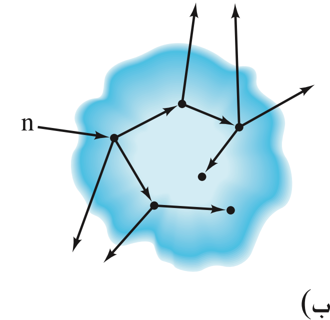
في حين تتمثل المشكلة الثالثة في أنّ بعض النيوترونات تفلت خلال سطح المفاعل قبل أن تسبب انشطارات أخرى (شكل 31 – 6). لذا، يجب أن تكون كتلة الوقود كبيرة بما فيه الكفاية لتعمل تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل. تُسَمّى أقلُّ كتلة نحتاج إليها **الكتلةَ الحرجةَ**، وتعتمد قيمة هذه الكتلة على المهدئ؛ نوع الوقود (يمكن استخدام $^{239}_{94}Pu$ بدلا من $^{235}_{92}U$) وعلى عملية إغناء الوقود. وتكون القيمة النموذجية بحدود بعض الكيلوجرامات (ليست جرامات ولا آلاف الكيلوجرامات).

الكتلة الحرجة

وحتى يكون لدينا تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل؛ فإنّه، في المتوسط، يجب أن يقوم نيوترون واحد على الأقل في كلّ انشطار بإنتاج انشطار آخر. ويُسَمّى متوسطُ عدد النيوترونات لكلّ انشطار الذي يقوم بعمل انشطارات أخرى معاملَ المضاعفة f.

* يمكن أن ينشطر $^{238}_{92}U$ ولكن بوجود نيوترونات سريعة. حيث أن (يورانيوم $^{238}_{92}U$ أكثر استقرارًا من $^{235}_{92}U$. كما أن احتمال امتصاصه لنيترونات سريعة بحدوث الانشطار والمحافظة على تفاعل متسلسل بذاته هو احتمال ضعيف.





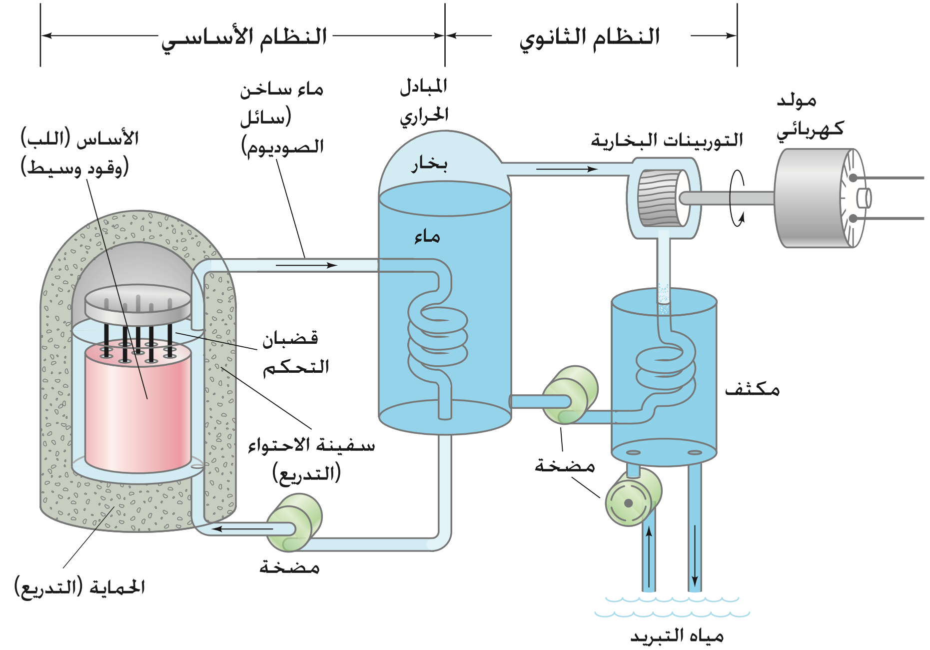
الشكل 31 – 6
إذا تجاوزت كمية اليورانيوم الكتلة الحرجة كما في (ب) فإنّ التغذية الذاتية للتفاعل المستلسل تكون ممكنة، أما إذا كانت الكتلة أقلّ من الكتلة الحرجة كما في (أ)، فإنّ غالبية النيوترونات نقلت قبل أن تظهر انشطارات إضافية، ولا تحصل تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل.

للتفاعلات المتسلسلة ذاتية التغذية؛ يجب أن تكون $f \geq 1$، إما إذا كانت $f < 1$، فإنّ التفاعل يُسَمّى تحت الحرج (Supercriticol) وإذا كانت $f > 1$ يُسَمّى التفاعل عندها فوق الحرج (Supercriticol) (ويمكن أن يصبح متفجرًا خطيرًا). تزوّد المفاعلات بقضبان تحكم متحركة (تمتص النيوترونات بشكل جيد مثل الكادميوم أو البورون) ويكون عملها امتصاص النيوترونات لإبقاء المفاعل* عند الحد الحرج $f = 1$ تمامًا.

التفاعل الحرج

أنواع المفاعلات النووية

تبنى المفاعلات النووية للاستخدام في الأبحاث أو لإنتاج الطاقة الكهربائية. يُنتج الانشطار عدة نيوترونات، وتعدّ المفاعلات البحثية أساسًا مصدر مكثف للنيوترونات. ويمكن استخدام هذه النيوترونات كقذائف في التفاعلات النووية لإنتاج نويّات غير موجودة في الطبيعة، بما فيها النظائر المستخدمة في التصوير والعلاج الإشعاعي. أما مفاعلات القدرة، فتستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية حيث تظهر الطاقة الناتجة من عملية الانشطار على شكل حرارة تستخدم في تسخين ماء لإنتاج بخار يدير توربينات موصولة بمولدات كهربائية (الشكل 31 − 7). يتكون قلب المفاعل النووي من الوقود والمهدئ (الماء في غالبية المفاعلات التجارية الأمريكية). ويكون الوقود غالبًا من اليورانيوم المخصّب بحيث يحتوي 2 إلى 4 في المئة من $^{235}_{92}U$. يسمح بمرور ماء ذي ضغط عالٍ أو سائل آخر (مثل الصوديوم السائل) خلال القلب. في حين تستخدم الطاقة الحرارية الممتصة لإنتاج بخار في المبادل الحراري بحيث يعمل الوقود الانشطاري كمصدر حراري للمحرك الحراري (الفصل 15).



(الشكل 31 - 7) مفاعل نووي. الحرارة الناتجة من عملية الانشطار
في قضبان الوقود تحمل بواسطة الماء الحار أو الصوديوم السائل، ثم تستخدم لتسخين الماء وتحويله إلى بخار في المبادل الحراري، ويقوم البخار بتشغيل توربين لتوليد الكهرباء وبعد ذلك يبرد بواسطة مكثف.

هنالك مشكلات مرتبطة بمولدات الطاقة النووية، إضافة إلى المشاكل الحرارية المعتادة المرافقة لأيّ آلة حرارية (البند 15 − 12). وهناك مشاكل فعلية من البقايا المشعة الناتجة في المفاعل بالإضافة إلى النويات الناتجة من تفاعل النيوترونات مع الأجزاء المكونة للمفاعل. إنّ الشظايا الناتجة من الانشطار مثلها مثل النويات الأم من اليورانيوم أو البلاتينيوم من حيث امتلاكها نيوترونات بنسبة 50% أكبر من البروتونات. تكون الأنوية التي لها عدد كتلي في المدى النوذجي لشظايا الانشطار (60 − 30 $\approx Z$) مستقرة إشعاعيًّا عندما يكون عدد النيوترونات فيها مساويًا لعدد البروتونات تقريبًا (انظر الشكل 30 − 2)، أمّا نواتج الانشطار التي يكون فيها عدد النيوترونات كبيرًا، فتكون غير مستقرة، وتنحلّ إشعاعيًّا. ومن الجدير بالذكر أنّ شظايا الانشطار التي تنتقل بالصدفة إلى الجوّ تشكل تهديدًا خطيرًا لصحة الإنسان بسبب التسرب المحتمل للنُّفايات الإشعاعية عند التخلص منها (البند 31 − 4).

نيوترونات أقل طاقة

* يحدث انطلاق النيوترونات والانشطارات اللاحقة بسرعة كبيرة جدًّا بحيث لا يمكن معها استخدام قضبان التحكم للحفاظ على المقدار $f = 1$ إذا لم تكن بنسبة ضئيلة تساوي (≈ 1%) من ما يُسَمّى النيوترونات المتأخرة. وهي ناتجة من اضمحلال النيوترون − انشطار الشظايا المخصبة؛ ما يجعل الأعمار الزمنية بحدود الثواني. وهي بذلك تكون كافية لتوفير زمن تفاعل كافٍ لتشغيل قضبان التحكم والمحافظة على المقدار $f = 1$.



الشكل 31 – 8

الدمار الناتج حول تشيرنوبل في روسيا بعد كارثة المفاعل النووي عام 1986.

تُعدّ الحوادثُ في جزيرة ثري مايل التابعة لبنسلفانيا (1979) و تشيرنوبل في روسيا (1986) مثالاً على بعض هذه الأخطار، وبينت أنّ المولدات النووية يجب أن تكون مصممة ومحمية، وتعمل بعناية ودقة شديدتين (الشكل 31-8). أخيرًا، فإنّ عمر مولدات القدرة النووية محدودة بثلاثين سنة تقريبًا بسبب التراكمات الإشعاعية، وحقيقة أنّ مكونات البناء نفسها تضعف مع الظروف الشديدة في الداخل. تأخذ إعادة تأهيل مفاعلات القدرة عدة أشكال، ولكن كلفة أي طريقة لإعادة التأهيل عالية جدًّا.

استعملت المفاعلات المسماة بمفاعلات التغذية (*breeder reactors*) كحلّ لمشكلة محدودية مصادر اليورانيوم القابل للانشطار. إنّ مفاعل التغذية هو أحد المفاعلات الذي فيه النيوترونات الناتجة من انشطار $^{235}_{92}U$ تمتص من $^{238}_{92}U$ و $^{239}_{94}Pu$ الناتجة من مجموعة التفاعلات الموضحة في (الشكل 31 – 1). إنّ $^{239}_{94}Pu$ قابل للانشطار بواسطة النيوترونات البطيئة، ويمكن استخدامه وقودًا نوويًّا في المفاعلات النووية بعد فصله. وبالتالي، فإنّ مفاعلات التغذية تمدّنا بوقود جديد* ($^{239}_{94}Pu$) بالإضافة إلى $^{238}_{92}U$ غير المفيد. يحتوي اليورانيوم الطبيعي على 99.3 في المئة من $^{238}_{92}U$، وهذا يعني أنّ الإمداد بالوقود الانشطاري يمكن أن يزيد على المعامل 100. إلا أنّ مفاعلات التغذية لها مشاكل المفاعلات الأخرى نفسها بالإضافة إلى مشاكل أخرى فعلية. لا يُعدّ البلوتونيوم خطرًا على الصحة بنفسه فقط (يشع بعمر نصف مقداره 24,000 سنة)، ولكن البلوتونيوم الناتج من المفاعل يمكن استخدامه في القنابل مما يزيد من خطر امتلاك الوقود النووي وسرقته من الإرهابيين لإنتاج القنابل.

إنّ الطاقة النووية ذات خطورة ممكنة، ولكن الطرق الأخرى المستخدمة بشكل واسع لإنتاج الطاقة كالنفط المعروف أو الفحم لها أيضًا أخطار بيئية ناقشنا بعضها في (البند 15 – 12) بما فيها تلوث الهواء والبقع النفطية. كما أنّ إطلاق غاز CO_2 يمكن أن يعمل كمصائد للحرارة كما في البيوت الزجاجية مما يزيد من حرارة الأرض. إنّ الحلول لحاجات العالم إلى الطاقة ليست تقنية فقط، ولكنّها اقتصادية وسياسية أيضًا. والعامل الأهم هنا هو حفظها، وعدم إضاعتها، واستخدامها في أضيق الحدود (تقليل، إعادة استخدام، إعادة تدوير).

المثال 31-5 **كمية وقود اليورانيوم**

احسب أقلّ كمية من $^{235}_{92}U$ نحتاج إليها لعمل انشطار لتشغيل مفاعل قدرته 1000-MW لكلّ سنة بشكل متواصل. افرض أنّ الكفاءة (الفصل 15) حوالي 33%.

النّهج: على كفاءة 33%، سنحتاج إلى $3 \times 1000\ \text{MW} = 3000 \times 10^6\ \text{J/s}$ من الطاقة المدخلة. وكلّ انشطار ينتج 200 MeV (المعادلة 31 – 5)، ونقسم الطاقة السنوية على 200 MeV للحصول على عدد الانشطارات اللازمة في السنة الواحدة، ومن ثمّ نضربها في كتلة ذرة اليورانيوم.

الحلّ: لإنتاج 1000 MW، سنحتاج إلى 3000 MW حيث يذهب 2000 MW كحرارة ضائعة، والطاقة الكلية الناتجة في سنة (3×10^7 s) تساوي

$$(3 \times 10^9\ \text{J/s})(3 \times 10^7\ \text{s}) \approx 10^{17}\ \text{J}$$

ينتج في كلّ انشطار 200 MeV، وعدد الانشطارات يساوي

$$\frac{(10^{17}\ \text{J})}{(2 \times 10^8\ \text{eV/fission})(1.6 \times 10^{-19}\ \text{J/eV})} \approx 3 \times 10^{27}\ \text{fissions}$$

كتلة ذرة اليورانيوم المنفردة حوالي $(235\ \text{u})(1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg/u}) \approx 4 \times 10^{-25}\ \text{kg}$. والكمية الكلية التي نحتاج إليها من اليورانيوم هي

$$(4 \times 10^{-25}\ \text{kg/fission})(3 \times 10^{27}\ \text{fissions}) \approx 1000\ \text{kg}$$

أي حوالي الطن.

ملحوظة: حيث إنّ $^{235}_{92}U$ يُشكّل 0.7% من اليورانيوم الطبيعي، فهذا يعني أننا نحتاج سنويًا إلى مئة طن يورانيوم تقريبًا، وهذه الكمية أقلّ مما نحتاج إليه من الفحم من حيث الكتلة والحجم (الفحم يعطي 2.8×10^7 J/kg).

* مفاعل التوليد لا تنتج وقوداً أكثر من استخدامها

التمرين جـ: تحتاج حاملة طائرات تعمل بالوقود النووي إلى 6000 kW من الطاقة المدخلة. كم عدد انشطارات $^{235}_{92}U$ لكلّ ثانية في هذه الطاقة؟

القنبلة الذّريّة

إنّ أول استخدام للانشطار النووي لم يكن لإنتاج الطاقة الكهربائية، بل لإنتاج قنبلة انشطارية (القنبلة الذرية). في بدايات الأربعينيات من القرن الماضي (بدايات 1940)، عندما كانت أوروبا مشتركة في الحرب العالمية، قام الزعيم الألماني أدولف هتلر بمنع بيع اليورانيوم من المناجم التشيكية التي احتلها حديثًا. لقد كانت الأبحاث التي أجريت على عملية الانشطار سريّة؛ بدأ الفيزيائيون في الولايات المتحدة بقرع جرس الإنذار، حيث قامت مجموعة من هؤلاء العلماء بتشجيع آينشتاين – الرجل الذي كان اسمه معروفًا في العالم كلّه – لإرسال رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت تتضمن إمكانية استخدام الانشطار النووي لصناعة قنبلة قوتها أكبر بكثير ممّا هو معروف سابقًا، وأخبروه فيها إنّ ألمانيا بدأت فعلًا بتطوير مثل هذه القنبلة. استجاب روزفلت بإقرار برنامج عرف بمشروع منهاتن لمعرفة إمكانية بناء مثل هذه القنبلة. بدأ العمل في إيرنست بعد أن شرح فيرمي عام 1942 أنّ التفاعل النووي المتسلسل يمكن حدوثه.

طوّر مختبر سرّيّ معزول في منطقة معزولة في نيومكسيكو عرف باسم لوس ألاموس، برئاسة ج. روبرت أوبنهيمر (1904 – 1967، الشكل 31 – 9)، وقد أصبح هذا المختبر موطنًا لكثير من مشاهير العلماء في أوروبا والولايات المتحدة لبناء القنبلة بحيث تكون تحت الحرجة (*Subcritical*) عند نقلها، ومن ثمّ تكون فوق حرجة (*Supercritical*) (لإنتاج تفاعل متسلسل). في اللحظة المناسبة، تستخدم قطعتان من اليورانيوم لكلّ منهما كتلة أقلّ من الكتلة الحرجة، ولكنهما معًا أكبر من الكتلة الحرجة. وتظلّ الكتلتان منفصلتين حتى لحظة التفجير، حيث تدفعان بقوة باتجاه بعضهما بعضًا بما يشبه البندقية، فيظهر التفاعل المتسلسل الذي يؤدي إلى التفجير.

توضع قنبلة من مادة متفجرة (TNT) حول كرة البلوتونيوم لضغطها بعد التفجير حتى تتضاعف كثافتها ممّا يجعلها فوق حرجة، وهذا هو الذي يسبب الانفجار. لقد اختبرت أول قنبلة انشطارية في صحراء نيومكسيكو في تموز (يوليو) عام 1945، وكانت ناجحة. وفي أوائل آب من ذاك العام، ألقيت قنبلة انشطارية باستخدام اليورانيوم على هيروشيما، أما الثانية التي استخدمت البلوتونيوم فقد ألقيت على ناجازاكي (الشكل 31 – 10) وكلاهما في اليابان، مما أدى إلى استسلام اليابان في الحرب العالمية الثانية، وانتهاء هذه الحرب بعد ذلك بوقت قصير.

وبالإضافة إلى القدرة التدميرية الكبيرة، فإنّ القنبلة الانشطارية تنتج عدة شظايا مشعّة كما في المفاعل النووي، وهذه الشظايا تتسرب إلى الجو عند انفجار القنبلة بما يُسَمّى التوابعَ المشعة (*radioactive fallout*).

إنّ اختبار القنابل النووية في الغلاف الجوي بعد الحرب العالمية الثانية كان مدعاة للقلق؛ بسبب حركة الكتل الهوائية التي تنشر التوابع المشعة في أنحاء الكرة الأرضية جميعها. حيث تترسب هذه التوابع المشعة أخيرًا في الأرض خصوصًا عند سقوط الأمطار، فتمتص من النباتات والأعشاب وتدخل إلى السلسلة الغذائية. وتعدّ هذه مشاكل أخرى أكثر خطورة من أثر الأشعة المباشر في أجسامنا؛ لأنّ جُسيمات α و β تمتص بشكل كبير من الملابس والطبقات الخارجية من الجلد. ولكن داخل أجسامنا، ومن خلال الطعام، فإنّ النظائر المشعة تتّصل مباشرة مع الخلايا الحية. إنّ أحد النظائر المشعة الخطرة هو $^{90}_{38}Sr$ الذي يشبه كيميائيًّا الكالسيوم بدرجة كبيرة. وإذا تركّز في العظام، فإنه يسبب السرطانات التي تدمّر نخاع العظم. لقد وقّعت معاهدة 1963 من مئة دولة تحظر اختبارات الأسلحة النووية في الغلاف الجوي، وطُلِب الالتزام بها بسبب الأخطار الناجمة عن التوابع المشعة.



الشكل 31 – 9 ج.روبرت أوبنهيمر إلى اليسار مع الجنرال ليسلي جروفر الذي كان رئيسًا لمختبر لوس ألاموس خلال الحرب العالمية الثانية. التقطت الصورة في موقع ترينيتي في صحراء نيومكسيكو حيث فجرت أول قنبلة ذرية.

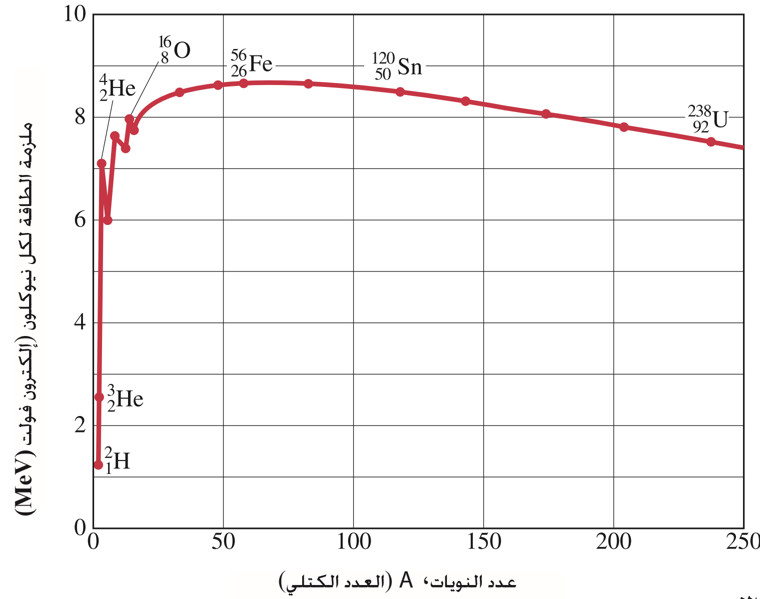
الشكل 31 – 10

صورة التقطت بعد شهر من إلقاء القنبلة الذرية على ناجازاكي. الأكواخ أنشئت بعد ذلك من الحطام المتبقي.



3-31 الاندماج النووي

إنّ كتلة أيّ نواة مستقرة أقلّ من كتل مكوناتها من البروتونات والنيوترونات. فعلى سبيل المثال، كتلة نظير الهيليوم $^{4}_{2}He$ أقلّ من كتلة نيوترونين مضافًا إليهما كتلة بروتونين، كما سنرى في (المثال 30 – 3). وعليه، إذا جمعنا بروتونين ونيوترونين لتشكيل نواة هيليوم، فسيكون لدينا نقص في الكتلة. وهذا النقص في الكتلة يظهر في إطلاق كمية كبيرة من الطاقة.



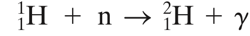
الشكل 31 – 11 متوسط طاقة الربط لكلّ نيوكليون كدالة في العدد الكتلي A للأنوية المستقرة. مثل (الشكل 30 – 1).

الاندماج النووي؛ النجوم

إنّ العمليةَ التي تُبنى بها الأنوية بتجميع نيوترونات وبروتونات منفصلة مع بعضها بعضًا، أو بناء أنوية كبيرة عن طريق تجميع مجموعة من الأنوية الصغيرة تُسمّى الاندماجَ النوويَّ. وتبين لنا نظرة سريعة إلى (الشكل 31 – 11) (مثل الشكل 30 – 1) سبب تجمّع الأنوية الصغيرة لتشكيل نواة أكبر مع إنتاج طاقة؛ ويتحقق هذا لأنّ طاقة الربط لكلّ نيوكليون أقلّ في حالة الأنوية الصغيرة منه في حالة الأنوية التي يزداد عددها الكتلي ($A \approx 60$ تقريبًا). ومن المتعارف عليه أنّ كثيرًا من العناصر في الطبيعة تتكوّن في الأصل من عملية الاندماج النووي (انظر الفصل 33) والاندماج مستمرٌّ حصوله اليوم داخل النجوم بما فيها شمسنا، ما ينتج كمية هائلة من الطاقة الإشعاعية التي تبثها.

المثال 31-6 الطاقة الناجمة عن الاندماج

يشمل أحد تفاعلات الاندماج النووي البسيطة تكوين الديتيريوم $^{2}_{1}$H من بروتون ونيوترون



$$^{1}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma$$

ما مقدار الطاقة الناجّة من هذا التفاعل؟

النّهج: تساوي الطاقةُ الناتجة الفرقَ في الكتلة بين المتفاعلات والنواتج مضروبًا في مربّع سرعة الضوء (c^2).

الحلّ: من الملحق B، تساوي الكتلة السكونية للمتفاعلات

$$1.007825\ \mathrm{u} + 1.008665\ \mathrm{u} = 2.016490\ \mathrm{u}$$

أمّا بعد التفاعل، فإنّ كتلة الناتج وهو $^{2}_{1}$H هي 2.014102 u. وفرق الكتلة يساوي

$$2.016490\ \mathrm{u} - 2.014102\ \mathrm{u} = 0.002388\ \mathrm{u}$$

وبالتالي، فإنّ الطاقة الناجّة هي

$$(\Delta m)c^2 = (0.002388\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u}) = 2.22\ \mathrm{MeV}$$

وتتوزع هذه الطاقة بين نواة $^{2}_{1}$H وأشعة γ.

تنجم الطاقة الصادرة عن الشمس من سلسلة من التفاعلات الاندماجية الآتية:

تفاعل اندماجي في الشمس (حلقة بروتون - بروتون)



$$^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + e^{+} + \nu \quad (0.42\ \mathrm{MeV}) \qquad \textbf{(31 - 6 أ)}$$



$$^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma \quad (5.49\ \mathrm{MeV}) \qquad \textbf{(31 - 6 ب)}$$



$$^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \quad (12.86\ \mathrm{MeV}) \qquad \textbf{(31 - 6 جـ)}$$

الطاقة الناجّة (القيمة Q) لكلّ تفاعل مبيّنة بين الأقواس.

إنّ التأثيرَ الكليّ لهذه التفاعلات التي تُسَمّى حلقة بروتون – بروتون هو تجمّعُ أربعة بروتونات لتشكيل نواة $^{4}_{2}\mathrm{He}$، وزوج من البوزيترونات، وزوج من النيوترينوات، وزوج من أشعة جاما



$$4\,^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2e^{+} + 2\nu + 2\gamma \qquad \textbf{(7-31)}$$

لاحظ أنّنا نحتاج إلى أول معادلتين من المعادلات السابقة (المعادلتان 31 - 6 أ، 31 - 6 ب) لإنتاج $^{3}_{2}\mathrm{He}$ اللازم للتفاعل في المعادلة الثالثة. والطاقة الناجمة عن التفاعل الصافي في (المعادلة $31 - 7$) هي $(2 \times 0.42\ \mathrm{MeV} + 2 \times 5.49\ \mathrm{MeV} + 12.86\ \mathrm{MeV}) = 24.7\ \mathrm{MeV}$ من جهة أخرى، فإنّ كلّ بوزيترون e^{+} في (المعادلة 31 - 6 أ) يتلاشى بسرعة مع إلكترون لإنتاج طاقة مقدارها $2m_e c^2 = 1.02\ \mathrm{MeV}$، وتكون الطاقة الكلية الناتجة $(24.7\ \mathrm{MeV} + 2 \times 1.02\ \mathrm{MeV}) = 26.7\ \mathrm{MeV}$. إنّ احتمالية التفاعل الأول وهو تكوين ديوتيريوم من بروتونين (المعادلة 31 - 6 أ) قليلة جدًّا، وأنّ الحدوث القليل لهذا التفاعل يخدم تقليل معدل إنتاج الشمس للطاقة.

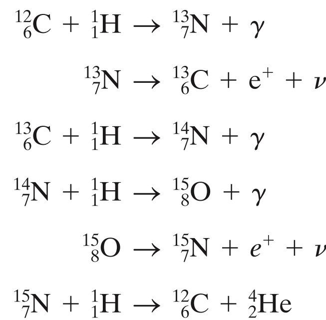
المثال 31-7 تقدير طاقة الاندماج

قدّر الطاقة الناتجة من التفاعل التالي في حالة حدوثه $^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

النّهج: نستخدم (الشكل $31 - 11$).

الحلّ: نرى من خلال (الشكل 31-11) أنّ كلًّا من $^{2}_{1}\mathrm{H}$ له طاقة ربط تساوي تقريبًا $1\frac{1}{4}\ \mathrm{MeV}$ لكلّ نيوكليون ولنواتين كتلتيهما 2 تساوي $4 \times (1\frac{1}{4}) \approx 5\ \mathrm{MeV}$. نواة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ لها طاقة ربط تساوي $7\ \mathrm{MeV}$ لكلّ نيوكليون وبالمحصلة، فإنّها تساوي $4 \times 7\ \mathrm{MeV} = 28\ \mathrm{MeV}$. وهنا، فإنّ الطاقة الناتجة تساوي $28\ \mathrm{MeV} - 5\ \mathrm{MeV} = 23\ \mathrm{MeV}$.

تنتج الطاقة في النجوم الأكثر حرارة من الشمس- غالبًا - من الكربون أو من دورة (CNO) التي تشمل سلسلة التفاعلات التالية:



$$^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$
$$^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + e^{+} + \nu$$
$$^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$
$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$
$$^{15}_{8}\mathrm{O} \rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N} + e^{+} + \nu$$
$$^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

دورة الكربون
(بعض النجوم)

من السهل أن ترى (انظر التمرين 35) بأنّه لا يوجد كربون مستهلك في هذه الدورة (انظر أول وآخر معادلتين)، وبأنّ التأثير الصافي يكون مثل حلقة البروتون - بروتون، (المعادلة 31 - 7)، (مضافًا إليها أشعة γ واحدة). لقد وُضعت نظرية حلقة البروتون – بروتون، وحلقة الكربون كمصدر للطاقة في النجوم والشمس أول مرّة من قِبَل هانزبيث (*Hans Bethe*) عام 1939.

المثال المفاهيمي 31-8 الاندماج في النجوم

ما أثقل عنصر يمكن إنتاجه عن طريق عملية الاندماج في النجوم؟

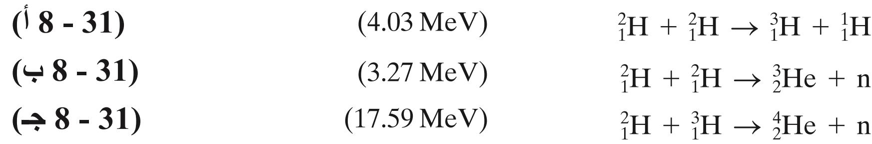
الإجابة: يكون الاندماج ممكنًا إذا كانت النواتج ذات طاقة ربط أكبر (كتلة أقلّ) من المتفاعلات، وبالتالي تنتج طاقة. وحيث إنّ منحنى طاقة الربط في (الشكل $31 - 11$) (أو الشكل $30 - 1$) تكون له قيمة قصوى في المدى $A \approx 56$ إلى 58 تقريبًا، وهذه تعود إلى الحديد أو النيكل، وبالتالي لن يكون مفضلا من حيث الطاقة إنتاج عناصر أثقل منها، وعلى الرغم من ذلك، فإنّه في مركز النجوم الثقيلة، وفي انفجار السوبر نوفا تكون هنالك طاقة حركيّة ابتدائية كافية لعمل تفاعلات ماصّةٍ للطاقة ينتج منها عناصر أثقل.

المفاعل الاندماجي

المفاعل الاندماجي المقترح

تُعدّ إمكانيةُ الانتفاع من الطاقة الناتجة من الاندماج لبناء مفاعلات قدرة مسألةً جذّابةً جدًّا. إنّ التفاعل الاندماجي يمكن نجاحه في المفاعل عند توافر نظائر الهيدروجين ^2_1H (الديتيريوم) و ^3_1H (التريتيوم) وتفاعلها كما يلي، مع وضع الطاقة الناتجة من كلّ تفاعل بين الأقواس:

التفاعلات الإندماجية للمفاعل المقترح



$$^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_1H + ^1_1H \quad (4.03\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 أ)}$$

$$^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_2He + n \quad (3.27\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 ب)}$$

$$^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2He + n \quad (17.59\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 جـ)}$$

وبمقارنة هذه الطاقة الناتجة مع ما ينتج من انشطار $^{235}_{92}U$ نستطيع رؤية أنّ الطاقة الناتجة في المفاعلات الاندماجية أكبر باستخدام الكتلة نفسها من الوقود النووي في الانشطار. بالإضافة إلى ذلك، وكوقود يمكن أن تُستخدم المفاعلات الاندماجية الديتيريوم الذي يتوافر في ماء المحيطات (الوفرة الطبيعية للديتيريوم ^2_1H هي 0.0115% بالمتوسط، أو حوالي $1g$ من الديتيريوم لكلّ $80\ L$ من الماء). ويمكن استخدام تفاعل البروتون - بروتون البسيط، في (المعادلة 31 - 6 أ) لزيادة توفير مصدر الوقود ^1_1H، إلا أنّ احتمالية حدوثه قليلة. لذا، لا يمكن اعتبار إمكانيته على الأرض.

ومع أنّ الاستفادة من المفاعلات الاندماجية لم تتحقق حتى الآن، إلا أنّ هنالك مشاريع مقترحة قد نُفِّذَتْ لاحتواء الصعوبات اللازمة. إنّ المشاكل مرتبطةً بحقيقة أنّ النويّات جميعها لها شحنة موجبة تتنافر مع بعضها بعضا. ومن هنا، فإنّ الاندماج يتحقق إذا استطعنا تقريب هذه الأنوية بشكل كافٍ من بعضها. بحيث تقوم قوة التجاذب النووي قصيرة المدى بدورها. ولكي تقترب الأنوية بشكل كافٍ من بعضها؛ فعليها امتلاك طاقة حركية كبيرة لتتغلب على قوة التنافر الكهربائية. يمكن الحصول على الطاقة الحركية العالية بسهولة من مسارعات الجُسيمات (الفصل 32)، ولكن عدد الجُسيمات هنا يكون قليلا جدًّا. ولإنتاج كمية معقولة من الطاقة؛ يجب أن نتعامل مع المادة بمقادير كبيرة تكون فيها الطاقة الحركية الكبيرة تعني درجات حرارة عالية. وفي الواقع، فإنّ درجات الحرارة العالية جدًّا مطلوبة لحدوث التفاعل الاندماجي، وتصنف أجهزة الاندماج على أنها أجهزة حرارية نووية. إنّ الشمس والنجوم الأخرى ذات درجات حرارة عالية جدًّا، أي ملايين الدرجات. لذا، فإنّ تفاعل الاندماج يمكن حدوثه فيها. كما أنّ الشمس والنجوم تُعدّ مفاعلًا حراريًّا نوويًّا ذاتيّ الإمداد. وتبقى متماسكةً بسبب جاذبيتها الكتلية الهائلة، أمّا على الأرض، فقد ثبتت صعوبة احتواء الأنوية المتحركة بسرعة عالية، والتي تحتاج إلى درجات حرارة وكثافات عالية.

لقد أصبح من المعروف بعد الحرب العالمية الثانية أنّ الحرارة الناتجة من القنبلة الانشطارية (أو الذرية) قريبة من $10^8\ K$. وهذا يدل على أنّ هذه القنبلة يمكن استخدامها لإشعال القنبلة الاندماجية (تعرف عادة باسم القنبلة النووحرارية أو الهيدروجينية) لتوفير الطاقة العالية للاندماج. تعدّ الطاقةُ غير المسيطر عليها الناتجة من طاقة الاندماج في القنبلة الهيدروجينية (عام 1952) سهلةَ الانطلاق نسبيًّا، ولكن لجعل الطاقة الناتجة من الاندماج معقولة، ويمكن استخدامها؛ يجب أن يتمّ هذا الاندماج ببطء وبمعدل مسيطر عليه. وهذا هو التحدّي الحقيقي.

المثال 31-9 الحرارة اللازمة لاندماج الديتريوم والتريتيوم (d – t)

قدّر الحرارة اللازمة لاندماج الديتيريوم والتريتيوم.

النّهج: بفرض أنّ النواتين تقتربان من بعضهما بعضًا بطاقة حركية KE، والقوة النووية تؤدّي دورها عندما تصبح المسافة بين مركزيهما مساوية لمجموع نصفي قطريهما. الطاقة الكامنة الكهربائية (البند 17 – 5) للجسيمين عند هذه المسافة يجب أن تساوي الطاقة الحركية الكلية للجسيمين عندما يكونان على مسافة من بعضهما بعضًا. ويرتبط متوسط الطاقة الحركية بدرجة الحرارة بالكلفن (K) حسب (المعادلة 13 – 8).

الحلّ: يُعطى نصف قطر كلّ نواة ($Z_1 = 2$ و $Z_2 = 3$) من (المعادلة 30 – 1): $r_d \approx 1.5\,\text{fm}$، و $r_t \approx 1.7\,\text{fm}$ لذا، يكون $r_d + r_t = 3.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$. نساوي الطاقة الحركية للجسيمين الابتدائيين بالطاقة الكامنة عندما يكونان قريبين من بعضهما

$$2\text{KE} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{(r_d + r_t)}$$

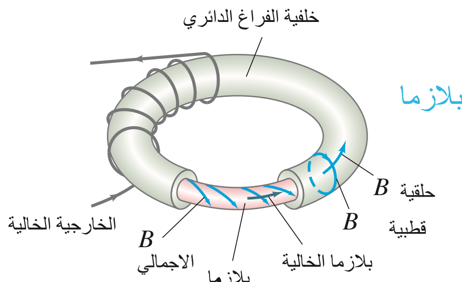
$$\approx \left(9.0 \times 10^9\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\frac{(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})^2}{(3.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} \approx 0.45\,\text{MeV}$$

وعليه، فإنّ $\text{KE} \approx 0.22\,\text{MeV}$. وإذا سألنا: هل متوسط الطاقة الحركية هنا عالٍ؟ فإنه من (المعادلة 13 – 8)، نحصل على $\frac{3}{2}kT = \overline{\text{KE}}$

$$T = \frac{2\overline{\text{KE}}}{3k} = \frac{2(0.22\,\text{MeV})(1.6 \times 10^{-13}\,\text{J/MeV})}{3(1.38 \times 10^{-23}\,\text{J/K})} \approx 2 \times 10^9\,\text{K}$$

ملحوظة: إنّ الحسابات الأكثر دقة تبيّن أنّ درجة الحرارة اللازمة لحدوث الاندماج (في الواقع) أقلّ من هذا التقدير التقريبي؛ لأنّه ليس من الضروري أن يكون متوسط الطاقة الحركية 0.22 MeV. إنّ طاقة أقلّ من هذه يمكن أن تكون كافية (الجُسيمات في ذيل توزيع ماكسويل، الشكل 13 – 18). ويدلنا حساب معقول لمفاعل الاندماج الذي يمكن استخدامه على أنّ درجة الحرارة هي بالمدى $2 \gtrsim T$ إلى $4 \times 10^8\,\text{K}$.

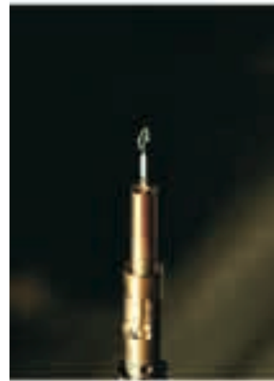
إنّ المفاعل الاندماجي لا يحتاج إلى الحرارة العالية فقط ، بل يجب أن تكون هنالك أيضًا كثافة كبيرة للأنوية لتوفير معدل عالٍ للتصادمات. إنّ الصعوبة الحقيقية للتحكم في الاندماج هي احتواء الأنوية لفترة طويلة كافية وبكثافة كافية لحدوث التفاعل لإنتاج الطاقة المراد استخدامها. وعند درجات الحرارة التي نحتاج إليها لحصول الاندماج تتأين الذرات. ويُسَمّى التجمع الناتج للأنوية والإلكترونات البلازما. تتبخّر المواد المألوفة عند بعض الآلاف من الدرجات في أفضل الحالات، وهنا لا نستطيع استخدامها لاحتواء تفاعل البلازما ذي درجات الحرارة العالية. وهناك طريقتان أساسيّتان لاحتواء مثل هذا التفاعل هما: الحجز المغناطيسي، والحجز القصوري. ففي الحجز المغناطيسي، نستخدم مجالًا مغناطيسيًّا لمحاولة احتواء تفاعل البلازما عالي الحرارة. وإحدى الإمكانيات لذلك هي باستخدام تصميم يشبه حلقة المرساة، (الشكل 31 – 12)، ويُعرف عادةً باسم توكاماك(*tokamak*).



الشكل 31 - 12 مخطط للتوكاماك يرينا المجال المغناطيسي الكليّ $\vec{\mathbf{B}}$ الناتج من تيار خارجي والتيار في البلازما نفسها.

أما الطريقة الثانية لاحتواء الوقود اللازم للاندماج فتُسَمّى الحجز القصوري، وفيها تطلق كُريّة صغيرة من الديتيريوم أو التريتيوم بشكل متواصل من عدة اتجاهات بواسطة حزمة كثيفة من أشعة الليزر (الشكل 31 – 13). يسخّن التدفقُ الكثيفُ للطاقةِ الكُريةَ ويؤيّنُها، ويحولها إلى بلازما، فيضغطها ويسخّنها إلى درجات حرارة يحدث عندها الاندماج. يقع زمن الحجز في مدى 10^{-11} إلى $10^{-9}\,\text{s}$. وخلال هذا الزمن، فإنّ الأيونات لا تتحرك بشكل يمكن تقديره بسبب قصورها الذاتي، وعندما يحدث الاندماج وتنفجر الكريّةُ.


(أ)


(ب)

الشكل 31 - 13
(أ) حجرة الأهداف (قطرها 5 m) في النوفا ليزر في مختبرات لورنس ليفرمور، وفيها تلتقي عشر حزمات من الليزر عند الهدف. (ب) هدف الديتيريوم - التريتيوم الذي قطره 1-mm مثبت في مكانه في مركز حجرة التفاعل.

31-4 مرور الإشعاع في المواد، أضرار الإشعاع

يشمل الإشعاع كلًّا من إشعاعات α، β، γ، والأشعة السينية (X)، بالإضافة إلى البروتونات، والنيوترونات، والجُسيمات الأخرى مثل البيونات (انظر الفصل 32). ولأنّ الجُسيمات المشحونة تستطيع تأيين الذرات والجزيئات التي تمر خلالها، فإنّها تُسَمّى إشعاعات مؤينة. ولأنّ الإشعاع ينتج تأيينًا، فإنّه يسبب أضرارًا كبيرة للمواد وخصوصًا الأنسجة البيولوجية.

إنّ الجُسيمات المشحونة مثل α، و β، والبروتونات تسبب تأيينًا بسبب القوّة الكهربائية، أي أنّه عند مرورها من خلال المواد فإنّها تستطيع التجاذب أو التنافر بقوة مع الإلكترونات لإزالتها من ذرات هذه المواد. تنتج إشعاعات α، و β من المواد المشعة، وبطاقة في المدى من 1 MeV (10^4 إلى 10^7 eV). وحيث إنّ تأيين الذرات يحتاج إلى طاقة بحدود 10 eV، فإنّ جسيم α أو β واحد يستطيع عمل الآلاف من عمليات التأيين.

تستطيع الجُسيمات المتعادلة أيضًا تأيين الذرات عند مرورها في المواد، فعلى سبيل المثال، تعمل فوتونات أشعة كلّ من X أو γ على تأيين الذرات باقتلاع الإلكترونات عن طريق الظاهرة الكهروضوئية وظاهرة كومتيون (الفصل 27). أضف إلى ذلك أنّه لو امتلكت أشعة γ طاقة كافية (أكبر من 1.02 MeV) فإنها تستطيع عمل ظاهرة إنتاج الأزواج التي ينتج منها إلكترون وبوزيترون (البند 27 – 6). وتستطيع الجُسيمات المشحونة الناتجة في كلّ من هذه العمليات إنتاج عمليات تأيين إضافية. ومن جهة أخرى، تتفاعل النيوترونات مع المواد بشكل رئيس عن طريق التصادمات مع الأنوية التي تتفاعل معها بقوة. وفي العادة، فإنّ النواة تنشطر إلى عدة أجزاء بمثل هذه التصادمات، وقد تسبب هذه الأجزاء أيضًا عمليات تأيين إضافية.

تطبيق الفيزياء
الأضرار البيولوجية

إنّ الأشعة المارة خلال المواد قد تُسبّب أضرارًا كبيرة. كما أنّ المعادن وبقية المواد تصبح هشة، وتضعف صلابتها إذا كانت الأشعة ذات كثافة عالية كما في المفاعلات النووية، أو في مركبات الفضاء عندما تمر في المناطق التي تحتوي على أشعة كونية كثيفة.

تنجم الأضرار الإشعاعية الناتجة في الأنظمة البيولوجية أساسًا عن التأيين الناتج في الخلايا. وهناك عدّة عمليّات مرتبطة يمكن أن تحدث نتيجة لذلك. تتفاعل الأيونات أو الجذور الناتجة كيميائيًّا وبشدة، ممّا يؤثر في العمليات الأساسية التي تقوم بها الخلية. أضف إلى ذلك أنّ أشكال الإشعاع جميعها تستطيع تأيين الذرات عن طريق اقتلاع الإلكترونات بعد اصطدامها بها، وإذا كانت هذه الإلكترونات هي الإلكترونات المسببة للروابط الكيميائية، فإنّ الجزيء يتفكك، ويتغير تركيبه، ممّا يؤدّي إلى عدم قيامه بآليته الطبيعية، أو قيامه بآلية ضارة. وفي حالة البروتينات، فإنّ فقدان جزيء واحد ليس خطيرًا إذا كان هنالك نسخ أخرى منه في الخلية، ويمكن أن تصنع نسخ إضافية منه من الجينات المسؤولة عنه. ومن جهة أخرى، فإنّ جرعات أكبر من الإشعاع تستطيع تدمير جزيئات كثيرة لا تستطيع الخلية صناعة نسخ أخرى منها بالسرعة الكافية، ممّا يؤدّي إلى موت الخلية.

إنّ الأضرار الناتجة في الحمض النووي DNA هي الأكثر خطورة بسبب احتواء الخلايا على نسخة واحدة. لذا، فأيّ تغيير في DNA يؤثر في الجين، ويغيّر آلية عمل الجزيء الذي يحويه، وبالتالي تموت الخلية مرة أخرى.

إنّ موت الخلايا بشكل منفرد لا يُعدّ مشكلة؛ لأنّ الجسم يستطيع إنتاج خلايا جديدة بدلًا منها. (هناك استثناء: وهو أنّ الخلايا العصبية لا تستبدل، لذا فنقصها يسبب مشكلة حقيقية) ولكن إذا ماتت عدة خلايا، فإنّ التشكيل البيولوجي لا يمكن تغطيته. ومن جهة أخرى، قد تبقى الخلية حية ولكنها تبقى ناقصة. وبانقسام هذه الخلية، يمكن أن ينتج تشكيل من الخلايا الناقصة مما يؤدّي إلى حدوث السرطان وهو إنتاج سريع للخلايا غير مسيطر عليه.

تقسم أضرار الإشعاع على التشكيلات البيولوجية إلى عدة أصناف: فالأضرار الجسدية تعود لأيّ جزء من الجسم باستثناء التي يمكن إعادة إنتاجها. تؤثر الأضرار الجسدية في جزء بيولوجي معين، وتؤدي إلى حدوث السرطان، وعلى جرعات عالية تؤدي إلى الإجهاد الإشعاعي (وأعراضه هي: الغثيان، والتعب، وتساقط الشعر، وغيرها من الأعراض) وقد تؤدي إلى الموت. أما الأضرار الجينية فتعود إلى الأضرار الناتجة في الخلايا المتجددة، والتي تسبب الطفرات الجينية. إنّ أكبر أثر لها هو انتقال الصفات الوراثية إلى الأجيال القادمة. إنّ الأضرار المحتملة الناتجة من استخدام الأشعة السينية (X) وبقية الأشعة يجب مواءمتها مع المنافع الطبية، واستمرار الحياة كنتيجة للاستخدامات التشخيصية لها.

5-31 قياس الإشعاع – قياس الجرعات الإشعاعية

مع أنّ مرور الإشعاعات المؤينة يسبب أضرارًا كبيرة عند مرورها بجسم الإنسان، إلا أنّه يمكن استخدام الإشعاع لعلاج أمراض معينة ومنها السرطان باستخدام حزمة ضيقة جدًّا توجه للورم السرطاني لتدميره (البند $31-6$). لذا، فإنه من المهم تحديد كمية الإشعاع أو الجرعة الإشعاعية، وهذا هو هدف قياس الجرعات الإشعاعية (*dosimetry*).

نشاطية المصدر

يمكن تحديد قوة المصدر الإشعاعي عند زمن معين بما يُسَمّى نشاطية المصدر (شدة النشاط الإشعاعي للمصدر) وهي عدد التحللات الناتجة في الثانية الواحدة. والوحدة التقليدية لها هي الكوري (Ci) وتعرف كما يلي:

الكوري (وحدة)

$$1\ \text{Ci} = 3.70 \times 10^{10}\ \text{(تحلل في الثانية)}$$

(هذه الصورة جاءت من التعريف الأصلي لنشاطية جرام واحد من الراديوم)، الكوري ما زالت مألوفة الاستخدام، ولكن وحدة النظام الدولي (SI) للوحدات لنشاط المصدر هي البيكوريل (Bq) وتعرف كما يلي:

البيكوريل (وحدة)

$$1\ \text{Bq} = 1\ \text{(تحلل في الثانية)}$$

إنّ المصادر التجارية للأنوية المشعة تحدد النشاطية عند زمن معين. وحيث إنّ هذه النشاطية تقلّ مع الزمن، ويكون هذا النقصان أكبر في النظائر قصيرة العمر، فإنّ من المهم أخذ ذلك بالحسبان.

تتناسب نشاطية المصدر $(\Delta N/\Delta t)$ مع عدد النويات المشعة عند لحظة معينة ومع عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ كما يلي: (انظر البند $30-8$):

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} N$$

المثال 31-10 النشاطية المأخوذة من الخلايا

في تجربةٍ معيّنة، وُجِّهت $0.016\ \mu\text{Ci}$ من $^{32}_{15}\text{P}$ نحو وسط يحوي تجمّعًا من البكتيريا. بعد ساعة واحدة، وبعد فحص الخلايا، قاس عداد كفاءته 70% (يسجل 70% من أشعة β التي يمتصها) كمية الإشعاع في الخلايا كلها، فسجل 720 عدًّا في الدقيقة. ما نسبة الإشعاع الذي امتصته الخلايا من المصدر $^{32}_{15}\text{P}$؟

النّهج: عمر النصف للمصدر $^{32}_{15}\text{P}$ هو حوالي 14 يومًا (الملحق B)، وتستطيع إهمال الفقدان في نشاطية المصدر خلال ساعة واحدة. ومن النشاطية المعطاة، تستطيع إيجاد كمية أشعة β الصادرة، ومقارنة 70% منها مع تحلل $(720/\text{min})/(60\ \text{s/min}) = 12$ التي يسجلها العداد.

الحلّ: العدد الأصلي للتحللات في الثانية الواحدة هو

$$(0.016 \times 10^{-6})(3.7 \times 10^{10}) = 590$$

وبما أنّ كفاءة العداد 70%، فإنه يعدُّ 70% من هذا العدد، أي 410 في الثانية الواحدة. وبما أنّه عَدَّ $12 = 720 / 60$ في الثانية الواحدة، فإن. $12/410 = 0.029$ أو 2.9% من الإشعاع تراكم في الخلايا.

الجرعة الممتصة

هناك نوع آخر من الأقيسة وهو التعرض الإشعاعي أو الجرعة الممتصة، ويمثل تأثير الإشعاع في المادة الممتصة. إنّ الوحدة القديمة للجرعة الإشعاعية هي الرونتجن (R) التي تعرف بدلالة كمية التأيين الناتجة من الإشعاع (1.6×10^{12}) أيون لكل جرام من الهواء الجاف في الظروف المعيارية). وأما الآن، فإنّ 1 R تعرّف بأنها كمية أشعة X أو γ والتي تودع $0.878 \times 10^{-2}\ \text{J}$ من الطاقة لكلّ كيلوجرام من الهواء. لذا، نستخدم الآن وحدة أخرى للجرعة الإشعاعية حيث نستطيع تطبيقها علىّ أي نوع من الإشعاع ألا وهي الراد (*rad*) بدلا من الرونتجن. والراد هي كمية الإشعاع التي تودع طاقة بمعدل $1.00 \times 10^{-2}\ \text{J/kg}$ في أيّ مادة ممتصة (وهذه قريبة من الرونتجن في حالة أشعتي X و γ). والوحدة المناسبة للجرعة الإشعاعية في نظام SI هي الجري (Gy) حيث

الراد (وحدة)

الجري (وحدة)

$$1\ \text{Gy} = 1\ \text{J/kg} = 100\ \text{rad} \qquad \textbf{(9-31)}$$

إنّ الجرعة الممتصة لا تعتمد فقط على شدة الحزمة الإشعاعية المتوافرة (عدد الجُسيمات في الثانية) وعلى الطاقة لكلّ جسيم، ولكنها تعتمد أيضًا على نوع المادة الممتصة للإشعاع. فالعظام مثلا، تمتص عادةً كمية من الإشعاع المستخدم أكبر من الكمية التي يمتصها اللحم. وعليه، فإنّ الجرعة الإشعاعية (بالراد أو الجري) للحزمة الإشعاعية نفسها عند مرورها في جسم الإنسان، تكون في العظام أكبر منها في اللحم.

إنّ الجري والراد وحدتان فيزيائيتان للجرعة الإشعاعية، وتمثلان الطاقة الممتصة من وحدة الكتلة للمادة. هاتان الوحدتان ليستا أكثر الوحدات التي لها معنى لقياس الأضرار البيولوجية الناجمة من الإشعاع؛ لأنّ الجرعات المتساوية للأنواع المختلفة من الإشعاع تسبب كميات مختلفة من الأضرار. فعلى سبيل المثال، يسبب راد واحد من أشعة α أضرارًا $10 - 20$ مرة أكبر من الأضرار الناجمة من راد واحد من أشعة β أو أشعة γ. ويظهر هذا الفرق بشكل أكبر؛ لأنّ أشعة α (وبقية الجُسيمات الثقيلة مثل البروتونات والنيوترونات) تتحرك ببطء أكبر من أشعتي β و γ اللتين لهما الطاقة نفسها بسبب كتلتيهما الأكبر، فالتصادمات المؤينة تظهر متقاربة من بعضها بعضًا، وينتج منها ضرر وتلف كبيران. إنّ التأثير البيولوجي النسبي (RBE) أو معامل الجودة (QF) لنوع معين من الإشعاع يعرف بأنّه كمية الإشعاع بالراد لأشعة X، أو أشعة γ التي تنتج الأضرار البيولوجية نفسها للراد الواحد من إشعاع معين. والجدول $31 - 1$ يعطينا معامل الجودة لأنواع متعددة من الإشعاع. وهذه الأرقام تقريبية؛ لأنّها تعتمد نوعًا ما على طاقة الجُسيمات، ونوع الدمار المستخدم كمعيار.

التأثير البيولوجي النسبي أو معامل الجودة

تُعطى الجرعة المؤثرة (الجرعة المؤثرة) بحاصل ضرب الجرعة الإشعاعية بالراد في معامل الجودة QF. وأمّا وحدتها فتعرف بـــــ رِم (*rem*) وهي مختصرة من الجرعة المكافئة للإنسان:

الجرعة المؤثرة

$$\text{(in rem)} = \text{dose (in rad)} \times \text{QF} \quad \text{(10-31 أ)}$$

وأمّا وحدة الجرعة الممتصة في النظام SI، فقد حلّت بدلا منها وحدة السيفيرت (*Sievert*) التي يرمز إليها بالرمز (Sv) وتساوي

وحدة السيفيرين

الجرعة المؤثرة

$$\text{(SV)} = \text{dose (Gy)} \times \text{QF} \quad \text{(10-31 ب)}$$

وبهذه التعريفات، فإنّ 1 rem أو (1 Sv) لأيّ نوع من الجرعة الإشعاعية له تقريبًا المقدار نفسه من الضرر البيولوجي. فعلى سبيل المثال، 50 rem من النيوترونات السريعة لها ضرر 50 rem من أشعة γ نفسه. ولكن لاحظ أنّ 50 rem من النيوترونات السريعة تساوي 5 rads فقط، في حين أنّ 50 rem من أشعة γ تساوي 50 rads.

وحدة الريم

جدول 31-1 معامل الجودة (QF) لأنواع مختلفة من الأشعة

نوع	معامل الجوده QF
أشعة X وأشعةγ	1
β (الكترونات)	≈ 1
بروتونات سريعة	1
نيوترونات بطيئة	≈ 3
نيوترونات سريعة	حتى 10
دقائق α وأيونات ثقيلة	حتى 20

نحن نتعرّض بشكلٍ ثابتٍ للحدّ الأدنى من إشعاعات المصادر الطبيعية مثل: الأشعة الكونية، والنشاطية الطبيعية في الصخور والتربة، والظهور الطبيعي للنظائر المشعة في طعامنا مثل $^{40}_{19}K$. يقع الرادون $^{222}_{86}Rn$ تحت التركيز المسيطر عليه في هذه الأيام، وهو ناجٌ من انحلال اليورانيوم؛ كما أنّه متوسط في سلسلة انحلال اليورانيوم (انظر الشكل $30 - 11$). تبقى معظم المتوسطات في الصخور التي تشكلت منها، ولكن الرادون عبارة عن غاز يتسرب من الصخور (ومن مواد البناء مثل الباطون) إلى الهواء الجوي الذي نتنفسه. وعلى الرّغم من أنّ الرادون غاز خامل كيميائيًّا (لأنّه عنصر نبيل) إلا أنّه ليس خاملًا فيزيائيًّا؛ لأنّه ينحلّ بإطلاق أشعة ألفا، كما أنّ نواتج هذا الانحلال مشعة أيضًا، إضافة إلى كونها غير نبيلة، ويمكنها الالتصاق بغلاف الرئة الداخلي.

الرادون

إنّ متوسط الخلفية الطبيعية للنشاط الإشعاعي يساوي 0.30 rem (300 mrem) تقريبًا بالسنة الواحدة لكلّ شخص في الولايات المتحدة. وبالطبع هنالك عدة متغيرات تسبب ذلك. فمن الأشعة السينية الطبيّة، فإنّ الشخص المتوسط يستقبل حوالي 50–60 mrem/year، وتعطينا هذه متوسط جرعة كلية مقدارها 360 mrem (3.6 mSv) لكلّ شخص. يقترح المنظمون الحكوميون حدًّا أعلى للجرعة الإشعاعية للشخص في المجتمع بحوالي 100 mrem (1 mSv) في السنة الواحدة باستثناء المصادر الطبيعية، وليس من المعروف فيما إذا كانت الجرعات الإشعاعية القليلة تزيد من فرصة حدوث السرطان والعيوب الجينية أم لا. لذا، علينا التصرف بحذر بحيث نبقي التعرض للجرعات الإشعاعية أقلّ ما يمكن.

أمّا حدّ الجرعة الإشعاعية الأعلى للأشخاص الذين يعملون في مناطق الإشعاع كالمستشفيات، ومحطّات توليد الطاقة، ومختبرات البحث فهو 5 rem (50 mSv) لكلّ الجسم في أيّ سنة من السنوات، وبحيث تكون أقلّ من 2 rem/yr بالمتوسط خلال خمس سنوات. وللكشف عن التعرض الإشعاعي؛ فإنّ الأشخاص الذين يعملون في مناطق الإشعاع يحملون بالعادة نوعًا من أنواع مقياس الإشعاع. ومن هذه الأنواع المألوفة (البطاقة) أو الباجة التي تحوي فيلمًا إشعاعيًّا. إنّ مرور الإشعاع المؤيّن خلال الفيلم يغيّره بحيث يصبح الفيلم مظلمًا خلال عملية التحميض، وهذا يبيّن الجرعة المستقبلة. وهناك أنواع أخرى جديدة تُسَمّى المقاييس الحرارية الضوئية (TLD). إنّ أجهزة قياس الإشعاع والباجات لا تحمي العاملين في مجال الإشعاع، ولكن المستويات العليا المسجلة تتطلّب إعادة تطوير خطوات عملية للحدّ من التعرض الإشعاعي لمستويات مقبولة.

شارات الافلام ومقاييس الجرعات

إنّ الجرعات العالية للإشعاع يمكن أن تسبب أعراضًا غير مرغوبة كالغثيان، والتعب، وتساقط الشعر. وتُعزى هذه التأثيرات إلى ما يُسَمّى بالمرض الإشعاعي. كما أنّ الجرعات العالية قد تكون مميتة. على الرغم من أن، فإنّ مدة التعرض للإشعاع مهمّة أيضًا. فالتعرض إلى جرعة مقدارها 1000 rem (10Sv) تكون قاتلة تقريبًا.

مرض الإشعاع

كما أنّ التعرّض لجرعة مقدارها (4-Sv) لمدة قصيرة قد تكون مميتة بنسبة 50% من الحالات. ومن جهة أخرى، فإنّ الجسم يعمل عمليّات إصلاح ملحوظة عند تعرضه للإشعاع. فمثلاً، إذا تعرّض الجسم لجرعة مقدارها 400-rem في زمن يمتدّ لعدة أسابيع، فإنّها لا تكون عادة مميتة، ولكنها قد تسبّب أضرارًا كبيرة للجسم. في حين أنّ تأثير الجرعات المنخفضة لمدة زمنية طويلة من الصعب تحديده، وما زال غير معروف حتى الآن.

المثال المفاهيمي 31-11 تقليل الجرعة الإشعاعية

انتبهت عاملة في مكان يحوي مصدرًا إشعاعيًّا إلى أنّ الجرعة الإشعاعية تتراكم بسرعة. فإذا أرادت أن تقلل تعرضها للإشعاع إلى العُشْر لتبقى في عملها بأمان حتى نهاية العام. فعليها أن تعمل على مسافة أبعد عن المصدر. فكم هذه المسافة المطلوبة؟

الأجوبة: إذا كانت الطاقة الإشعاعية تنتقل بشكل منتظم في الاتجاهات جميعها، فإنّ كثافة الإشعاع (الجرعة/المسافة) يجب أن تقلّ مع مربع المسافة مثل الموجات الصوتية والضوئية. وعليه، إذا عملت على مسافة أكبر بأربع مرات بعيدًا عن المصدر، فإنّ التعرّض يقلّ بنسبة 1 إلى 16 وهي مسافة كافية لتبقى بأمان.

المثال 31-12 الجرعة الإشعاعية لكلّ الجسم

ما الجرعة الإشعاعية التي يمتصها كامل الجسم لعامل مختبر كتلته 70-kg عند تعرضه لـ 40-mCi من المصدر المشع $^{60}_{27}Co$ على افتراض أنّ مساحة مقطع الجسم $1.5\ m^2$، ويقع عادةً على بعد 4.0 m تقريبًا من المصدر، ويتعرض للإشعاع بمعدل 4.0 h في اليوم. $^{60}_{27}Co$ يبعث أشعة γ طاقتها 1.33 MeV و 1.17 MeV بتتابع سريع. تتفاعل 50% تقريبًا من أشعة γ مع الجسم، وترسب طاقتها كلّها، في حين تخترق البقية الجسم.

النَّهج: نسبة الطاقة الإشعاعية من الطاقة المنبعثة كلّها التي تمرّ خلال جسم العامل تساوي مساحته مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m (الشكل 31 – 14).

الحل: الطاقة الكلية لأشعة γ لكلّ انحلال تساوي $(1.33+1.17)\ MeV=2.50\ MeV$، والطاقة الكلية التي تبث من المصدر في الثانية الواحدة

$$(0.040\ \text{Ci})(3.7\times10^{10}\ \text{decays/Ci}\cdot\text{s})(2.50\ \text{MeV}) = 3.7\times10^{9}\ \text{MeV/s}$$

إنّ النسبة من هذه الطاقة التي تمرّ خلال الجسم تساوي مساحة مقطع الجسم $(1.5\ m^2)$ مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m (الشكل 31 – 14) وتساوي

$$\frac{1.5\ \text{m}^2}{4\pi r^2} = \frac{1.5\ \text{m}^2}{4\pi(4.0\ \text{m})^2} = 7.5\times10^{-3}$$

ومعدل الطاقة التي ترسب في الجسم (تذكر أنّ 50% فقط من أشعة γ تتفاعل مع الجسم) هو

$$E = \left(\tfrac{1}{2}\right)(7.5\times10^{-3})(3.7\times10^{9}\ \text{MeV/s})(1.6\times10^{-13}\ \text{J/MeV}) = 2.2\times10^{-6}\ \text{J/s}$$

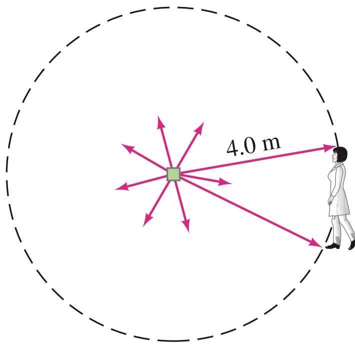
ولأنّ $1\ \text{Gy} = 1\ \text{J/kg}$، فإنّ معدّل الجرعة الإشعاعية للجسم الذي كتلته 70-kg كلّه هو $(2.2\times10^{-6}\ \text{J/s})/(70\ \text{kg}) = 3.1\times10^{-8}\ \text{Gy/s}$ وبفترة 4.0 h، فإنّ مقدار الجرعة الإشعاعية يساوي

$$(4.0\ \text{h})(3600\ \text{s/h})(3.1\times10^{-8}\ \text{Gy/s}) = 4.5\times10^{-4}\ \text{Gy}$$

ولأنّ $QF \approx 1$ لأشعة جاما، فإنّ الجرعة المؤثرة (المعادلة 31 -10ب) تساوي $450\ \mu Sv$ أو (انظر المعادلة 31 - 9):

$$(100\ \text{rad/Gy})(4.5\times10^{-4}\ \text{Gy})(1) = 45\ \text{mrem} = 0.45\ \text{mSv}$$

ملحوظة: هذه الجرعة المؤثرة التي تساوي 45-mrem هي حوالي 50% من الجرعة المسموحة في السنة الكاملة (100 mrem/yr) أو 1% من أقصى جرعة سنوية مسموحة للعاملين في الإشعاع. يجب ألّا يتعرض هذا العامل لمثل هذه الجرعة يوميًّا. لذا، فعليه الابتعاد لتقليل هذه الجرعة (وضع حواجز على المصدر، أو تغيير العمل، أو العمل على مسافة أبعد ...إلخ).



الشكل 31 – 14 انتشار الإشعاع للاتجاهات جميعها. الشخص الذي يقع على بعد 4.0 m يستقبل نسبة من الإشعاع مقدارها مساحة مقطعه مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m. (مثال 31 - 12)

6-31 المعالجة الإشعاعية *

قد يكون الإشعاع مفيدا جدًا (ليس خطيرًا فقط)

تطبيق الفيزياء
المعالجة الإشعاعية

إنّ تطبيقات النشاط الإشعاعي بالنسبة للإنسان وبقية الكائنات الحية تشكل مجالًا واسعًا يملأ الكثير من الكتب؛ ففي المجال الطبي هنالك وجهان: 1 - المعالجة الإشعاعية، وهي معالجة الأمراض (خاصة السرطان) وهو ما سنعالجه في هذا البند. 2 - تشخيص الأمراض، والذي سنناقشه في البنود القادمة من هذا الفصل.

قد يسبّب الإشعاعُ السرطانَ، ولكن يمكن استخدامه في معالجته أيضًا. فالنمو السريع للخلايا السرطانية قابل (بشكل خاص) للتدمير بواسطة الإشعاع. لا نحتاج إلى جرعات عالية لقتل الخلايا السرطانية، وبعض الخلايا السليمة المحيطة سوف تقتل حتمًا. ولهذا، فإنّ الحالة المرضية التي تتعرّض للعلاج الإشعاعي سوف تعاني من بعض الأعراض الجانبية من الإجهاد الإشعاعي. ولتقليل تدمير الخلايا السليمة؛ نستخدم حزمة ضيقة من أشعتي γ أو X عندما يكون الورم السرطاني محصورًا بشكلٍ جيّد. تُوجّه الحزمةُ مباشرةً باتجاه الورم، ويدور المصدر (أو الجسم) بحيث تخترق الحزمة الإشعاعية أجزاء مختلفة من الجسم لجعل الجرعة الإشعاعية للمكان الواحد أقلّ ما يمكن باستثناء الورم والأماكن المحيطة به مباشرة، حيث تمر بها الحزمة في الأوقات جميعها (الشكل 31– 15). قد يكون مصدر الإشعاع من $^{60}_{27}Co$، أو من آلة تصدر الأشعة السينية (X) والتي تصدر فوتونات في المدى من 200 keV إلى 5 MeV. إنّ البروتونات، والنيوترونات، والإلكترونات، والبيونات التي تنتج في مسارعات الجُسيمات (البند 32 - 1) قد تستخدم أيضًا في المعالجة الإشعاعية.

وفي بعض الحالات. تدخل عينة صغيرة من ب ب مشعة مباشرة داخل الورم السرطاني. والتي بدورها ستدمر معظم الخلايا السرطانية. وبطريقة مشابهة تتم معالجة سرطان الغدة الدرقية عن طريق ادخال اليود المشع $^{131}_{53}I$. حيث تقوم الغدة الدرقية بتركيز اليود الموجود في مجرى الدم وخاصة في أي منطقة تكون فيها أورام سرطانية. وتقوم أشعاعاته بتدمير الخلايا المعتلة.

وعلى الرّغم من أنّ الإشعاع يمكن أن يزيد من مدة حياة عدة حالات، إلّا أنّه لا يكون فاعلًا بشكلٍ كامل. كما أنّه لا يتمكن أحيانًا من القضاء على الخلايا السرطانية كلّها. لذا، فهنالك احتماليةٌ لعودة المرض. وفي كثير من الحالات خصوصًا عندما تكون الخلايا السرطانية غير متمركزة في مساحة واحدة، فإنّ من الصعب معالجته دون تدمير الأعضاء السليمة.

وهناك فائدة أخرى للإشعاع تتمثل في تعقيم اللفائف الطبية، وأدوات الجراحة، وحتى في تغليف الطعام حيث تقتل البكتيريا والفيروسات، أو تقلّ فاعليتها بسبب الجرعات العالية من الإشعاع.



(الشكل 31 – 15)
يدور مصدر الأشعة بحيث تمر الحزمة الإشعاعية خلال الخلايا المريضة ولكن مع تقليل الجرعة لبقية الجسم.

7-31 اقتفاء الأثر الإشعاعي والتصوير في الأبحاث والطب *

تطبيق الفيزياء
اقتفاء الأثر (التخطيط) في الطب والبيولوجيا

نستخدم النظائر المشعة في الأبحاث الطبية والبيولوجية لاقتفاء الأثر الإشعاعي. وهناك مركبات معينة يمكن تركيبها باستخدام نظير مشع مثل $^{14}_{6}C$ أو $^{3}_{1}H$. مثل هذه الجزيئات، يمكن اقتفاء أثرها عندما تتحرك في النسيج الحيّ، أو عندما تعمل تفاعلات كيميائية.

ويمكن الكشف عن ظهور هذه الجزيئات (أوجزء منها إذا عملت تفاعلات كيميائية) باستخدام عداد جايجر أو عداد الومضات الذي يكشف الإشعاعات الصادرة (انظر البند 30 - 13). كيف تهضم جزيئات الطعام؟ ولأيّ أجزاء الجسم يتم تحولها ويمكن اقتفاء أثرها؟ تستخدم متتبعات الأثر الإشعاعية لتحديد كيفية تركيب الحموض الأمينية، والمركبات الأساسية الأخرى في الكائنات الحية.

يمكن تحديد نفاذية جدار الخلية للجزيئات والأيونات المختلفة باستخدام النظائر المشعة. تقذف الجزيئات والأيونات باتجاه السائل خارج الخلايا، وتقاس النشاطيةُ الإشعاعية التي تظهر داخل الخلايا وخارجها كدالة مع الزمن.

وبتقنية تُسَمّى التصوير بالإشعاع الذاتي (*autorodiography*) تكشف أماكن النظائر المشعة على شريط فلمي، فعلى سبيل المثال، فإنّ توزيع الكاربوهيدرات التي تنتج في أوراق النبات من امتصاص CO_2 يمكن ملاحظتها بترك النبتة في محيط بيئي تكون فيه ذرات الكربون في CO_2 هي النظير المشع $^{14}_{6}C$.

وبعد زمن معين، توضع الورقة بثبات على لوح (تصويري) فوتوغرافي، والإشعاع الناتج يجعل الفيلم معتمًا بشكل أكبر في الأماكن التي تكون فيه النظائر مركزة بشكل أقوى (الشكل 31 – 16أ). يُستخدم التصوير بالإشعاع الذاتي لتحديد النيوكليوتايدات (مركبات DNA) التي تعكس الكثير من التفاصيل عن تطابق DNA (الشكل 31 – 16ب). وللتشخيص الطبي، فإنّ النويات المشعة المستخدمة هذه الأيام هي $^{99m}_{43}Tc$، الحالة المهيجة طويلة العمر من التيكنيتيوم 99 (الرمز m يعود إلى الحالة شبه المستقرة) ويتكون عند انحلال $^{99}_{42}Mo$، الاستخدام الكبير للنظير $^{99m}_{43}Tc$ بسبب نصف العمر الملائم له والذي يساوي 6 h (قصير، ولكنه ليس قصيرًا جدًّا) بالإضافة إلى حقيقة أنه يستطيع الارتباط مع عدد متنوّع من المركبات. يُختار المركب المرتبط بالنواة المشعة؛ لأنه يتركز في الأجهزة أو مناطق التشريح المراد دراستها. توضع كواشف خارج الجسم لتسجيل التوزيع الإشعاعي للمركبات المحددة أو تصويره. ويمكن إجراء الكشف باستخدام كاشف منفرد (الشكل 31 - 17) بحيث يتحرك حول الجسم، ويقيس كثافة النشاط الإشعاعي عند عدد كبير من النقاط. إنّ النشاط الإشعاعي النسبي هو أداة تشخيصية. فعلى سبيل المثال، فإنّ النشاطية الإشعاعية العالية أو المنخفضة قد تمثل فوق نشاطية أو تحت نشاطية للجهاز الحيوي أو جزء منه، وقد تمثل في حالة أخرى آفة أو ورمًا خبيثًا.

وهنالك آلات تصوير أكثر تعقيدًا تعمل باستخدام أشعة جاما، وتستخدم أكثر من كاشف، كما أنّها تسجل بالتناوب النشاطية الإشعاعية عند عدة نقاط. ويمكن أن تعرض الكثافات المقيسة على شاشة تلفزيون أو حاسوب تعمل على إنجاز دراسات متحركة (تغير فيها الصورة مع الزمن).

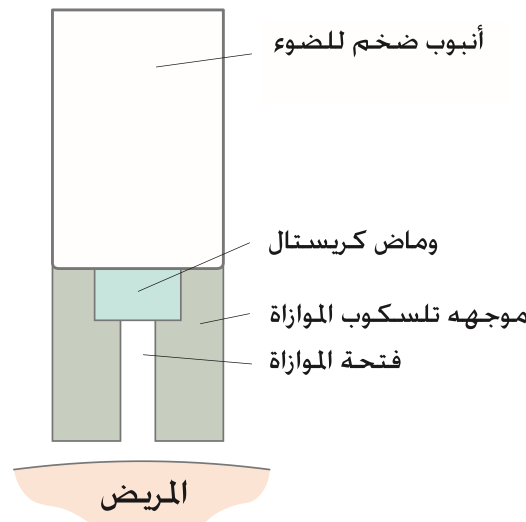
(الشكل 31 - 16) (أ) صورة بتقنية التصوير بالإشعاع الذاتي لورقة نبات القرع التي تعرضت لـ $^{14}CO_2$ المشع مدة 30 s. مناطق التمثيل الضوئي (الخضراء) أصبحت مشعة، أمّا المناطق التي لا يكون فيها تمثيل ضوئي من العروق فإنّها تخلو من ^{14}C، ولا تجعل ورقة الأشعة السينية سوداء. هذه التقنية مهمة في النمط التالي من نقل التغذية في النبات
(ب) صورة لكروموسوم من DNA لنبات معيّن. النقاط المرتبة على الفيلم ترينا النمو على شكل حرف Y للنقاط في الـ DNA المنقسم.



(أ)



(ب)



الشكل 31 – 17 الكاشف الذي يستخدم أشعة جاما المسددة لعمل تصوير متحرك للحالة. من الضروري أن يختار المسدّد أشعة جاما التي تأتي بخط مستقيم من الحالة. ودون هذا المسدّد، فإنّ أشعة γ ستأتي من الجسم، فتصطدم بالوامض منتجة صورة غير واضحة.

* 8-31 التصوير الإشعاعي الطبقي الانبعاثي

إنّ الصورة المتكونة باستخدام الطرق القياسية للطب النووي المشروحة باختصار في الجزء السابق تنتج من متتبع أثر من مصدر إشعاعي في حجم معيّن من الجسم. ومن الممكن أيضًا تصوير الانبعاث الإشعاعي من مقطع أو شريحة من الجسم باستخدام التصوير الإشعاعي الطبقي المبرمج، والذي نوقش في (البند 25 - 12). وهناك آلة تصوير أساسية تعمل بأشعة جاما تتحرك حول الحالة لقياس الشدة الإشعاعية لمتتبع الأثر عند عدة نقاط وعدة زوايا، وتعالج المعلومات بالطريقة المتبعة نفسها في التصوير بالأشعة السينية (X-ray CT scans) المشروحة في (البند 25 - 12). تُسمّى هذه التقنيةُ التصويرَ الإشعاعيَّ الطبقيَّ باستخدام انبعاث الفوتون المنفرد (SPET).*

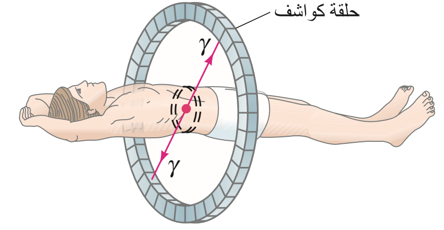
تطبيق الفيزياء
التصوير الطبيّ
SPET

* المعروف أيضاً باسم SPECT "فوتون واحد التصوير المقطعي الانبعاثات".

كما أنّ هنالك تقنيةً أخرى مهمّةً تُسَمّى التصويرَ الإشعاعيَّ الطبقيَّ باستخدام انبعاث البوزيترون (PET)، والتي تستخدم باعثات البوزيترون مثل $^{11}_{6}C$، و $^{13}_{7}N$، و $^{15}_{8}O$، و $^{18}_{9}F$ التي لها عمر نصف قصير. تندمج هذه النظائر مع الجزيئات عند حقنها أو استنشاقها، وتتراكم في الجهاز الحيوي أو عضو الجسم المراد دراسته. عندما تبعث هذه النويات أشعة β، فإنّ البوزيترون المنبعث يسير عدة مليمترات قبل اصطدامه بإلكترون عادي. وفي هذا التصادم، فإنّ البوزيترون والإلكترون يتلاشيان بحيث يعطيان فوتوني جاما ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$)، وكلّ منهما له طاقة تساوي 511 keV ($= m_e c^2$). ينطلق فوتونا جاما باتجاهين متعاكسين ($180° \pm 0.25°$) بحيث يكون لهما المقدار نفسه من الزخم الخطي تمامًا لتحقيق قانون حفظ الزخم الخطي (الزخم الخطي لكلّ من e^+ و e^- الابتدائيين يساوي صفرًا مقارنة بالزخم الزاوي لفوتوني جاما النهائيين). ولأنّ الفوتونين يتحركان على الخط نفسه باتجاهين متعاكسين، فإنّ كشفهما يتمّ باستخدام حلقة متمركزة من الكواشف تحيط بالحالة (الشكل 31 - 18) بحيث تثبت بسهولة على الخط الذي يحدث عليه الانبعاث. وإذا حُدِّدَ الفرقُ في زمن وصول الشعاعين بدقة، فإنّ الموقع الحقيقي للنوية الباعثة على ذلك الخط يمكن حسابه. تستطيع الإلكترونيات –حاليا- قياس الزمن بدقة تصل إلى ± 300 ps. كما أنّ الموقع الحقيقي يمكن تحديده على افتراض أنّ سرعة أشعة جاما ($c = 3 \times 10^8$ m/s)بدقة تصل إلى $d = vt \approx (3 \times 10^8\,\text{m/s})(300 \times 10^{-12}\,\text{s}) \approx 10\,\text{cm}$ وهي ليست مفيدة جدًّا. وبالإضافة إلى ذلك، هنالك جهود مستقبلية لقياس زمن الطيران لتحديد الموقع. في هذه الأيام، يستخدم التصوير الإشعاعي الطبقي المبرمج وعلى نحو مشابه للتصوير بأشعة X (CT)، والذي يمكن من خلاله إعادة تكوين صورة PET بتفريق (*resolution*) يقع في حدود 3–5 mm. تتمثل الإيجابيات الكبيرة لاستخدام PET في عدم الحاجة إلى مسدّد (كما هو الحال في كشف الفوتون المنفرد – انظر الشكل 31 - 17) كما أنّ الفوتونات التي تبدّد قليلة. وبالتالي، فإنّ الجرعات التي يمكن إعطاؤها للحالة باستخدام PET قليلة.

إنّ النظامين PET و SPET يعطياننا صورًا ترتبط بالكيمياء الحيوية؛ وبالأيض وبآلية العمل. ويمكن مقارنة هذا مع التصوير بالأشعة السينية (البند 25-12) والتي تعكس صورتها الشكل والتركيب، وتشكّل تشريحًا للمنطقة المصورة.

PET



الشكل 31 – 18
التصوير الإشعاعي الطبقي باستخدام انبعاث البوزيترون (PET) تستخدم حلقة من الكواشف بأنبوب مضاعف ضوئي (البند 30 - 13) لكشف أشعتي جاما الناتجتين من التفاعل ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) γ اللتين تنبعثان بزاوية 180° مع بعضهما بعضا.

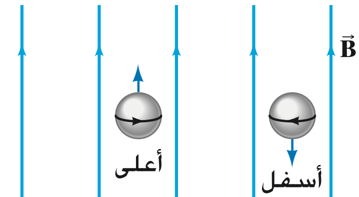
9-31 الرنين النووي المغناطيسي (NMR) والتصوير بالرنين النووي المغناطيسي (MRI)

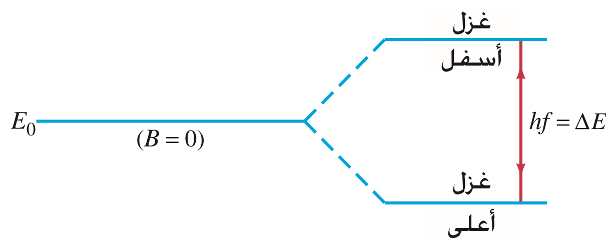
NMR

بعد اكتشافه عام 1946، أصبح الرنين النووي المغناطيسي، بشكل سريع، طريقة فاعلة جدًّا في الكثير من المجالات، من الفيزياء إلى الكيمياء والكيمياء الحيوية، كما أنّه تقنية مهمة في التصوير الطبي. في البداية، سنناقش باختصار هذه الظاهرة، ثم ننظر بعد ذلك إلى تطبيقاتها.

رأينا في (الفصل 28) (البند 28 - 6) أنّه عندما توضع الذرات في مجال مغناطيسي، فإنّ مستويات الطاقة الذرية تنقسم إلى عدة مستويات متقاربة (انظر الشكل 28 - 8). كما أنّ الأنوية أيضًا تحقق هذه الخصائص المغناطيسية. وسنختبر فقط أبسط نواة وهي نواة الهيدروجين (H) لأنّها الأكثر استخدامًا حتى في التصوير الطبي. تتكون نواة $^{1}_{1}H$ من بروتون منفرد. وكالإلكترون، فإنّ زخمه الزاوي المغزلي (وعزمه المغناطيسي) يأخذ قيمتين فقط عندما يوضع في مجال مغناطيسي، ونسميهما غزل للأعلى (مواز للمجال) وغزل للأسفل (معاكس للمجال) كما هو مبين في (الشكل 31 - 19). وعندما يظهر المجال المغناطيسي تنقسم طاقة النواة إلى مستويين كما هو موضح في (الشكل 31 - 20) حيث يأخذ الغزل العلوي (الموازي للمجال) الطاقة الأقلّ (يشبه ظاهرة زيمان لمستويات الطاقة الذرية، الشكل 28 - 8).

الشكل 31 – 19
يمثل رسم تخطيطي بروتون في مجال مغناطيسي $\vec{B}$ (نتيجة إلى أعلى) في حالتين إحداهما يغزل للأعلى والأخرى يغزل للأسفل.





الشكل 31 – 20: ينقسم مستوى الطاقة E_0 بغياب المجال المغناطيسي إلى مستويين للطاقة عند تطبيق مجال مغناطيسي.

يتناسب فرق الطاقة ΔE بين هذين المستويين مع المجال المغناطيسي الكلي B_T المطبق على النواة:

$$\Delta E = kB_T$$

حيث k هو ثابت تناسب يختلف للأنوية المختلفة.

في جهاز الرنين النووي المغناطيسي القياسي (NMR) توضع العينة المراد اختبارها في مجال مغناطيسي مستقر. تطبق إشارة ذات تردّد راديوي (RF) من إشعاع كهرومغناطيسي (فوتونات) على العينة. إذا كان التردد f لهذه الإشارة يساوي فرق الطاقة بين المستويين تماما (الشكل 31 - 20) فيكون:

$$hf = \Delta E = kB_T \qquad \textbf{(11 - 31)}$$

وهنا، فإن الفوتونات في الحزمة ذات التردد الراديوي ستمتص وستعمل على إثارة الأنوية من المستوى الأقل إلى المستويات الأعلى. وهذه هي ظاهرة الرنين التي يمكن الكشف عن فوتوناتها حيث يكون هنالك امتصاص محدّد فقط عندما يكون التردد f قريبًا جدًا من $f = kB_T/h$ ومن هنا جاءت تسمية الرنين النووي المغناطيسي. لنواة ^1_1H الحرة، فإنّ التردد هو هيرتز 42.58 MHz لمجال مغناطيسي $B_T = 1.0\ T$. إذا كانت ذرات الهيدروجين مرتبطة في جزيء، فإنّ المجال المغناطيسي الكليّ B_T المطبق على أنوية الهيدروجين سيكون مجموع المجال المغناطيسي الخارجي (B_{ext}) المطبق مضافًا إلى المجال المغناطيسي الموضعي (B_{local}) الناتج من إلكترونات وأنوية الذرات المجاورة. ولأنّ f تتناسب مع B_T، فإنّ قيمة f لمجال مغناطيسي خارجي مؤثر سوف تكون مختلفة قليلاً بالنسبة لذرات الهيدروجين المرتبطة مقارنة بذرات الهيدروجين الحرة:

$$hf = k(B_{ext} + B_{local})$$

يمكن قياس هذا الفرق البسيط في التردد الذي يسمّى (الانحراف الكيميائي). وهناك تفاصيل أكثر تمّ تعلمها عن تراكيب الجزيئات والروابط باستخدام مثل هذه الأقيسة للرنين النووي المغناطيسي (NMR).

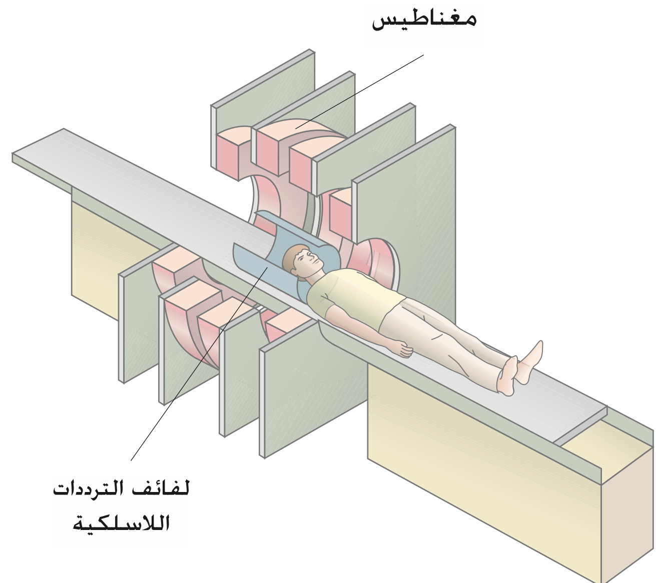
يستخدم الهيدروجين لإنتاج صورة مفيدة طبيًّا للرنين النووي المغناطيسي (NMR) – تُسَمّى اليوم MRI أو التصوير بالرنين المغناطيسي – لأنّه العنصر الأكثر شيوعًا في جسم الإنسان، ويعطينا إشارة NMR قوية.

تطبيق الفيزياء

التصوير بالرنين النووي المغناطيسي (*MRI*)

جهاز التصوير بالرنين النووي المغناطيسي موضح في (الشكل 31 - 21). الملف الكبير يعطينا المجال المغناطيسي الموضعي، وملف RF ينتج إشارة RF للأمواج الكهرومغناطيسية (الفوتونات) وهي التي تسبب قفز الأنوية من المستويات السفلى إلى المستويات العليا (الشكل 31 - 20). يمكن أن تكشف هذه الملفات (أو ملف آخر) امتصاص الطاقة أو انبعاث الإشعاع (أيضًا التردد $f = \Delta E/h$، المعادلة 31 - 11) عندما تقفز الأنوية إلى مستوى سفلي.

(الشكل 31 - 21) جهاز التصوير بالرنين النووي المغناطيسي (أ) مخطط (ب) صورة

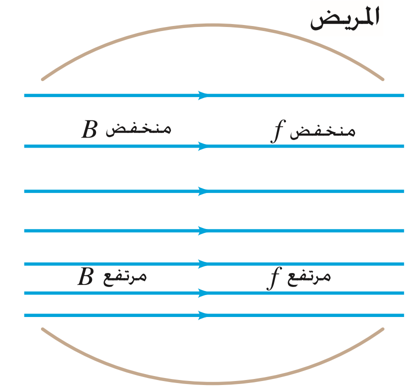


(أ)



(ب)

يمكن تكوين الصورة في بعدين أو ثلاثة بتقنية شبيهة بالتصوير الإشعاعي الطبقي (البند 25 - 12). وأنّ أبسط شيء يمكن قياسه لتكوين الصورة هو كثافة الإشعاع الممتص أو المنبعث من النقاط المختلفة للجسم، وهذه ستكون قياسًا لكثافة ذرات الهيدروجين عند كلّ نقطة. ولكن كيف نستطيع تحديد الجزء من الجسم الذي يصدر الفوتون منه؟ إنّ إحدى التقنيات هي بإعطاء المجال المغناطيسي الموضعي تدرّجًا مع الموقع. أيْ أنّه بدلًا من تطبيق مجال مغناطيسي منتظم B_T، فإنّ هذا المجال يعمل بحيث يتدرج مع الموقع على طول العينة (أو الجسم). وحيث يتناسب التردّد المُمتَصّ بواسطة أنوية الهيدروجين مع B_T (المعادلة 31 - 11)، فإنّ هناك مستوى واحدًا في الجسم سيكون له قيمة مناسبة للمجال B_T ليمتص الفوتونات التي يكون لها تردد محدد f. وبتغيير f، يمكن قياس الامتصاص بواسطة المستويات المختلفة. وبشكل متناوب، إذا كان تغيّر المجال يطبق بعد إشارة **RF**، فإنّ تردد الفوتونات المنبعثة سوف يقاس من المكان الذي ينبعث منه. (انظر الشكل 31 - 22).



(الشكل 31 – 22)
المجال الموضعي الذي يكون أقوى في القاع من القمة. يتناسب تردد الشعاع الممتص أو المنبعث تتناسب مع B في NMR

إذا كان تدرج المجال المغناطيسي باتّجاه واحد يطبق خلال الاستثارة (امتصاص الفوتونات) وانبعاث فوتونات بتردد متفرد، فإنّ أنوية الهيدروجين الموجودة فقط في شريحة دقيقة سوف تستثار، وبتطبيق تدرّج للمجال المغناطيسي باتّجاه مختلف، عمودي على الأول خلال إعادة الانبعاث، فإنّ التردد f للإشعاع المنبعث سوف يمثل عمق تلك الشريحة. وهنالك طرق أخرى يمكن استخدامها لربط تردد NMR مع الموقع لتدريج المجال المغناطيسي خلال حجم الجسم.

إنّ إعادة بناء الصورة التي تعتمد على كثافة ذرات الهيدروجين (كثافة الشعاع الممتص أو المنبعث) ليس مفيدا كثيرًا. ولكن الأكثر فائدة هو التصوير المستند إلى المعدل الذي تنحل به الأنوية للعودة إلى المستوى الأرضي (المستقر). وهذه الصورة يمكن أن تنتج بتحليل يصل إلى 1 mm أو أفضل. إنّ تقنية NMR هذه (تُسَمّى أحيانًا الصدى المغزلي) تنتج صورًا قيمتها التشخيصية عالية لكلا الغرضين وهما: وصف التركيب (التشريح)، و دراسة عمليات الأيض. هناك صورة بواسطة NMR موضحة في (الشكل 31 - 23).



(الشكل 31 – 23)
ألوان غير صحيحة لصورة NMR لمقطع عمودي خلال الرأس يرينا تركيب الدماغ الطبيعي.

إنّ التصوير بواسطة NMR غير ضار للإنسان. ونستطيع حساب طاقة النوتونات اللازمة والتي ذكرت سابقًا في مجال مغناطيسي شدته 1.0-T وتردد $f = 42.58\ \text{MHz}$ للنظير $^{1}_{1}\text{H}$. وهذا يكافئ طاقة مقدارها $hf = (6.6 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(43 \times 10^{6}\ \text{Hz}) \approx 3 \times 10^{-26}\ \text{J}$ أو حوالي 10^{-7} eV. ولأنّ الروابط الجزيئية حول 1 eV، فمن الواضح أنّ الفوتونات ذات التردد الراديوي يمكن أن تسبب تمزيقًا قليلا للخلايا، وهذا يجب أن يقارن بأشعة X أو أشعة γ التي طاقتها في المدى من 10^{4} إلى 10^{6} eV، والتي يمكن أن تسبب تدميرًا كبيرا. يُعتقد بأنّ المجال المغناطيسي الموضعي الذي يعدّ كبيرًا نوعًا ما $(\approx 0.1 - 1\ \text{T})$ غير مؤذٍ (باستثناء الأشخاص الذين يستعملون جهازًا منظمًا لنبضات القلب).

يرينا (الجدول 31 – 2) قائمة للتقنيات الحديثة المتطورة التي ناقشناها للتصوير الداخلي للجسم. وبالطبع، فإنّ قوة التبيين (*resolution*) هي العامل الوحيد الذي يجب أخذه بالحسبان هنا. وعلينا تذكر أنّ طرق التصوير المختلفة توفر عدة أنواع من المعلومات المفيدة لعدة أنواع من التشخيص.

الجدول 31 – 2

التقنية	مكانها في هذا الفصل	التبيين
التصوير التقليدي بأشعة X	البند 25 - 12	$\frac{1}{2}$ mm
أشعة X، CT-Scan	البند 25 - 12	$\frac{1}{2}$ mm
متتبعات الأثر الطّبية	البند 31 - 7	1 cm
SPET	البند 31 - 8	1 cm
NET	البند 31 - 8	3–5 mm
NMR	البند 31 - 9	$\frac{1}{2}$–1 mm
الأمواج فوق الصوتية	البند 12 - 9	2 mm

ملخص

يظهر التفاعل النووي عندما تتصادم نواتان لإنتاج نواتين أو أكثر، أو جُسيمات مختلفة. في هذه العملية وكما في النشاط الإشعاعي، تظهر تحوّلات في العناصر.

طاقة التفاعل أو القيمة - Q للتفاعل

$a + X \rightarrow Y + b$ هي

$$Q = (M_a + M_X - M_b - M_Y)c^2 \quad \textbf{(1-31)}$$

$$= K_b + K_Y - K_a - K_X \quad \textbf{(2-31)}$$

في الانشطار النووي، تنشطر نواة ثقيلة كاليورانيوم إلى نواتين متوسطتي الحجم بعد قذفها بنيوترون. تنشطر $^{235}_{92}U$ بعد قذفها بنيوترونات بطيئة، في حين تحتاج بعض الأنوية الأخرى إلى نيوترونات سريعة لانشطارها. ينجم كثير من الطاقة عن الانشطار؛ لأنّ طاقة الربط لكلّ نيوكليون أقلّ في الأنوية الثقيلة منها في الأنوية المتوسطة. وتكون كتلة النواة الثقيلة أكبر من الكتلة الكلية لنواتج الانشطار.

ينطلق من عملية الانشطار نيوترونات، وهنالك إمكانية لحدوث تفاعل متسلسل. الكتلة الحرجة هي أقلّ كتلة نحتاج إليها من الوقود النووي لعمل تفاعل متسلسل. في المفاعلات النووية أو القنبلة النووية، نحتاج إلى مهدىء يعمل على إبطاء سرعة النيوترونات المنطلقة.

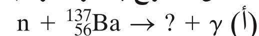
في عملية الاندماج النووي، تندمج أنوية صغيرة لتكوين نواة أكبر. كما ينتج هنا طاقة أيضًا. يُعتقد أنّ الطاقة الناجّة من شمسنا تنجم عن تفاعلات انشطارية تُسَمّى حلقة البروتون – بروتون، والتي يتحد فيها أربعة بروتونات لتكوين نواة $^{4}_{2}He$ ، وينتج أكثر من $25\,MeV$ من الطاقة. المفاعلات الاندماجية المفيدة لإنتاج الطاقة لم تثبت إمكانية تطويرها بسبب صعوبة احتوائها على الوقود النووي (الديتيريوم مثلا) لفترة طويلة عند درجات الحرارة العالية التي تحتاج إليها. يمكن أن يسبب الإشعاعُ إتلافَ المواد بما فيها الأنسجة البيولوجية. هنالك عدة وحدات وضعت لتقدير كمية الإشعاع: فالكوري (Ci) والبيكويرل (Bq) وحدتان تقيسان نشاطية المصدر أو معدل إشعاع العينة $1\,Ci = 3.70 \times 10^{10}$ disintegration/s و $1\,Bq = 1$. تُحدّد الجرعة الممتصة دائمًا بالراد (rad) التي تقيس كمية الطاقة المترسبة في وحدة الكتلة من المادة الممتصة: *1 rad* هي كمية الإشعاع الذي يودع طاقة بمعدل $10^{-2}\,J/kg$ من المادة وحدة النظام الدولي *SI* للجرعة الممتصة هي الجري (Gy) حيث $1\,Gy = 1\,J/kg = 100\,rad$. تُحدّد الجرعة المؤثرة دائمًا بالرم (rem) حيث: $\textbf{rem} = rad \times QF$ و QF هو معامل الجودة لنوع معين من الإشعاع. تقريبًا، 1 rem من أيّ نوع من الجرعات الإشعاعية يعمل المقدار نفسه من التلف البيولوجي. متوسط الجرعة الإشعاعية التي يتعرّض لها الأشخاص في الولايات المتحدة في السنة الواحدة حوالي $0.36\,rem$. وحدة النظام الدولي SI للجرعة المؤثرة هي السيفيرت (Sv) حيث $1\,Sv = 10^{2}\,rem$.

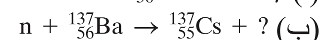
*[تستخدم الإشعاعات النووية طبّيًا في العلاج وتصوير العمليات البيولوجية، بالإضافة إلى أنواع عديدة من التصوير الطبقي لجسم الإنسان مثلة في: PET، وSPET، و MRI، والأخيرة هي أحدث أنواع التصوير باستخدام ظاهرة الرنين النووي المغناطيسي (NMR)]

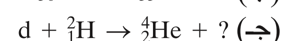
أسئلة

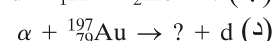
(ملحوظة: الكتل موجودة في الملحق ب).

1. أكمل الفراغ بالنواة أو الجسيم المناسبين:


(أ) $n + ^{137}_{56}Ba \rightarrow ? + \gamma$


(ب) $n + ^{137}_{56}Ba \rightarrow ^{137}_{55}Cs + ?$


(جـ) $d + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ?$


(د) $\alpha + ^{197}_{79}Au \rightarrow ? + d$

حيث d تمثل الديتيريوم.

2. ينتج النظير $^{32}_{15}P$ من التفاعل $n + ? \rightarrow ^{32}_{15}P + p$. ماذا يجب أن تكون النواة الهدف؟

3. عندما يقذف $^{22}_{11}Na$ بالديوترون $^{2}_{1}H$ تنتج جسيم α. ما هي النواة الناجّة؟

4. لماذا يعدّ النيوترون قذيفة مثالية لإنتاج التفاعلات النووية؟

5. عند اصطدام بروتون بالنواة $^{20}_{10}Ne$، نلاحظ انبعاث جسيم α. ما هي النواة الناجّة؟ اكتب معادلة التفاعل.

6. هل نواتج الانشطار النووي هي باعثات لأشعة β^+ أم β^-؟ فسّر إجابتك.

7. إذا كان $^{235}_{92}U$ ينتج في المتوسط *1.5* نيوترون لكلّ انشطار، فهل من الممكن حدوث التفاعل المتسلسل؟ وإذا كان هذا ممكنا، فماذا سيكون الاختلاف؟

8. ينتج $^{238}_{92}U$ *2.5* نيوترون بالمتوسط لكلّ انشطار مقارنة بـ $^{239}_{94}Pu$ الذي ينتج *2.9* نيوترون لكلّ انشطار. إذا أخذنا عينة نقية من كليهما، فأيهما ستكون له كتلة حرجة أقلّ؟ فسّر إجابتك.

9. تظهر الطاقة الناجّة من الانشطار النووي على شكل طاقة حرارية. لأيّ شيء تكون هذه الطاقة الحرارية؟

10. لماذا لا يُخَصّب اليورانيوم بالطرق الكيميائية؟

11. كيف يستطيع النيوترون الذي لا يمتلك طاقة حركية إثارة النواة في المدى الموضح في (الشكل 31 - 2)؟

12. لماذا تكون قطعة اليورانيوم ذات المسامات الأكثر قابلة للانفجار عند حفظها في الماء أكبر من قابليتها للانفجار عند حفظها في الهواء؟

13. يستطيع مفاعلٌ يستخدم يورانيوم عالي التخصيب استخدامَ الماء العادي (بالإضافة إلى الماء الثقيل) كمهدئ، ومع ذلك يبقى لدينا تفاعل متسلسل مدعوم ذاتيًا. فسّر ذلك.

14. لماذا يجب أن تُنتِج عملية الانشطار نيوترونات لكي تكون مفيدة؟

15 ناقش الحسنات والسلبيات النسبية بما فيها التلوث والأمان للطاقة الناتجة لكلّ من الوقود الأحفوري، والانشطار النووي، والاندماج النووي.

16. ما سبب وجود النظام الثاني في المفاعل النووي في (الشكل 31 – 7)؟ أي لماذا لم نستخدم الماء الذي سخن من الوقود مباشرة لتشغيل التوربينات؟

17 لماذا تنتج النيوترونات في التفاعل الانشطاري؟

18 لماذا تخترق جُسيمات جاما المواد بسهولة أكثر من جُسيمات بيتا؟

19 لماذا تحتاج إلى حرارة أكبر في حالة تفاعل الديتيريوم -ديتيريوم منها في حالة تفاعل الديتيريوم - تريتيوم؟ فسر إجابتك.

20 تنتج الطاقة الضوئية المنبعثة من الشمس والنجوم من عملية اندماج. ما الشروط اللازمة داخل النجوم لجعل هذا ممكنًا؟

21 كيف تحافظ النجوم والشمس على حجز البلازما للاندماج؟

22 ما الفروقات الأساسية بين الاندماج النووي والانشطار النووي؟

23 يواجه الأشخاص الذين يعملون حول المواد المعدنية التي تنتج جُسيمات ألفا خطرا قليلا من الاقتراب أو حتى من ملامسة هذه المواد، ولكن عليهم أخذ الحيطة و الحذر من ابتلاعها. لذا، هناك قواعد صارمة تمنع الأكل والشرب في أثناء العمل، وعند تصنيع المعادن كذلك، لماذا؟

24. لماذا تكون الجرعة الإشعاعية القصوى الموصى بها للنساء في مراحل الطفولة أعلى منها للنساء الشابات؟

25. يستخدم الإشعاع أحيانًا لتعقيم الأدوات الطبية وحتى الطعام. اشرح كيفية هذه العملية؟

26. ما الفرق بين كلّ من الجرعة الممتصة والجرعة المؤثرة؟ ما وحدات النظام الدولي SI لكليهما؟

27. كيف نستطيع استخدام متتبعات الأثر المشعة في الكشف عن شق في أنبوب؟

مسائل

(ملحوظة: الكتل موجودة في الملحق ب)

31-11 التفاعلات النووية وتحوّلات العناصر

1. (I) يتكون الألمنيوم الطبيعي كلّه من $^{27}_{13}Al$. إذا امتص نيوترونا، فماذا يصبح؟ هل ينحلّ بواسطة β^- أم β^+؟ ماذا ستكون النواة الناتجة؟

2. (I) هل يحتاج التفاعل $^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + n$ إلى طاقة ابتدائية؟ وضّح ذلك.

3. (I) هل التفاعل $n + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{239}_{92}U + \gamma$ ممكنًا بواسطة نيوترونات بطيئة؟ فسّر إجابتك.

4. (II) هل يحتاج التفاعل $p + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{4}_{2}He + \alpha$ إلى طاقة، أم أنّه يعطي طاقة؟ ما مقدار هذه الطاقة؟

5. (II) احسب الطاقة الناتجة (أو الطاقة اللازمة) لحدوث التفاعل $\alpha + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + n$

6. (II) (أ) هل يمكن حدوث التفاعل $n + ^{24}_{12}Mg \rightarrow ^{23}_{11}Na + d$ إذا كان الجسم المقذوف يمتلك طاقة حركية مقدارها 10.00 MeV؟ (d تمثّل الديتيريوم $^{2}_{1}H$). (ب) إذا كان كذلك، فما مقدار الطاقة الناتجة؟

7. (II) (أ) هل يمكن حدوث التفاعل $p + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{4}_{2}He + \alpha$ إذا كانت الطاقة الحركية للبروتون الساقط = 2500 keV ؟ (ب) إذا كان كذلك، فما الطاقة الحركية الكلية للنواتج؟

8. (II) في التفاعل $\alpha + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + p$، تمتلك جُسيمات α الساقطة طاقة حركية مقدارها 7.68MeV (أ) هل يمكن حدوث هذا التفاعل؟(ب) إذا كان كذلك، فما الطاقة الحركية الكلية للنواتج؟ كتلة $^{17}_{8}O$ تساوي 16.999131 u.

9. (II) احسب القيمة Q لتفاعل القنص التالي: $\alpha + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{20}_{10}Ne + \gamma$.

10. (II) احسب الطاقة الحركية الكلية للنواتج في التفاعل $d + ^{13}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + n$ إذا كان الديوترون d يمتلك طاقة حركية KE = 36.3 MeV.

11. (II) ينتج $^{14}_{6}C$ المشع في الجو عندما يمتص النيوترون من النواة $^{14}_{7}N$. اكتب معادلة التفاعل، واحسب القيمة Q.

12. (II) مثال على تفاعل الانتزاع النووي (Stripping): $d + ^{6}_{3}Li \rightarrow X + p$.
(أ) لماذا سمّي تفاعل انتزاع؟ (ب) ما هي النواة الناتجة X؟ (جـ) ما القيمة Q لهذا التفاعل؟ هل التفاعل ماصّ للحرارة أم طارد لها؟

13. (II) مثال على تفاعل الالتقاط (picK – up) النووي $^{3}_{2}He + ^{12}_{6}C \rightarrow X + \alpha$. (أ) لماذا سمّي تفاعل التقاط؟ (ب) ما هي النواة الناتجة؟ (جـ) ما القيمة Q لهذا التفاعل؟ هل التفاعل ماص للحرارة أم طارد لها؟

14. (II) أكمل التفاعل النووي التالي: $p + ? \rightarrow ^{32}_{16}S + \gamma$، (ب) احسب القيمة Q لهذا التفاعل.

15. (II) يحتاج التفاعل $p + ^{18}_{8}O \rightarrow ^{18}_{9}F + n$ إلى طاقة مدخلة تساوي 2.453 MeV. ما هي كتلة $^{18}_{9}F$؟

31 – 2 الانشطار النووي

16. (I) احسب الطاقة الناتجة من التفاعل الانشطاري $n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{88}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 12n$. استخدم الملحق B وافترض أنّ الطاقة الحركية الابتدائية للنيوترون الساقط قليلة جدًّا.

17. (I) ما الطاقة الناتجة من التفاعل الانشطاري في (المعادلة 31-4)؟ (كتل $^{141}_{56}Ba$، و $^{92}_{36}Kr$ هي 140.914411 u، و 91.926156 u على الترتيب.)

18. (I) كم عدد الانشطارات التي تحدث في الثانية الواحدة في مفاعل قدرته 200-MW؟ افرض أنّها تنتج طاقة مقدارها 200 MeV في الانشطار الواحد.

19. (II) الطاقة الناتجة من مفاعل انشطاري حوالي 200 MeV لكلّ انشطار. ما الكتلة السكونية للنواة $^{235}_{92}U$ المقابلة لهذه الطاقة؟

20. (II) لديك التفاعل الانشطاري التالي:
(أ)$^{235}_{92}U + n \rightarrow ^{133}_{51}Sb + ^{98}_{41}Nb + ?n$ كم عدد النيوترونات الناتجة في هذا التفاعل؟(ب) احسب الطاقة الناتجة. الكتل الذرية لكلّ من Sb، وNb هي 132.915250 u، و 97.910328 u على الترتيب.

21. (II) ما هي كتلة $^{238}_{92}U$ اللازمة لإنتاج الكمية نفسها من الطاقة الناتجة من احتراق 1.0 kg من الفحم (حوالي 3×10^7 J)؟

22. (II) افرض أنّ معدل الطاقة الكهربائية التي يحتاج إليها منزل في اليوم والليلة تساوي 950 W. ما كتلة $^{235}_{92}U$ اللازمة لعمل انشطار يزوّد هذا المنزل بالطاقة لسنة كاملة؟(افرض أنّ الطاقة الناتجة من الانشطار الواحد هي 200 MeV، وأنّ الكفاءة 100%).

23. (II) ما الكتلة الابتدائية لليورانيوم $^{235}_{92}U$ اللازمة لتشغيل مفاعل قدرته 650-MW لسنة كاملة؟ افرض أنّ الكفاءة 40%.

24. (III) افرض أنّ نواتج انشطار $^{236}_{92}U$ عبارة عن نواتين متساويتين بالكتلة تقريبًا. احسب الطاقة الكامنة الكهربائية عند لحظة الانشطار. افرض أنّ النواتين الناتجتين كرويتا الشكل (انظر المعادلة 30 - 1). قارن حساباتك بالطاقة الناتجة من الانشطار والتي تساوي 200 MeV تقريبًا.

31 – 3 الاندماج النووي

25. (I) ما متوسط الطاقة الحركية للبروتونات في مركز نجم حرارته 10^7 K؟ (مساعدة: استخدم المعادلة 13 - 8).

26. (II) بيّن أنّ الطاقة الناتجة من التفاعل الاندماجي $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}H + n$ هي 17.59 MeV.

27. (II) بيّن أنّ الطاقة الناتجة من اندماج ديروترونين لتكوين $^{3}_{2}He$ مع انطلاق نيوترون تساوي 3.27 MeV.

28. (II) تحقق من القيمة Q لكلّ تفاعل في (المعادلات 31 - 6). [تنويه: احذر عند التعامل مع الإلكترونات).

29. (II) احسب الطاقة الناتجة لكلّ جرام من الوقود في (المعادلات 31 - 8أ، ب، جـ). قارن مع الطاقة الناتجة لكلّ جرام من اليورانيوم في الانشطار النووي.

30. (II) كم الطاقة الناتجة عندما تمتص $^{238}_{92}U$ نيوترونًا بطيئًا (KE ≈ 0) وتصبح $^{239}_{92}U$؟

31. (II) إذا كان متوسط استهلاك المنزل التقليدي 950 W من الطاقة الكهربائية. فما أقلّ كمية من وقود الديتيريوم يجب استخدامها في السنة لتزويد هذا المنزل باحتياجاته الكهربائية؟ استعن بالتفاعل الموضح في (المعادلة31 - 8ب).

32. وضّح أنّ الطاقة التي تحملها كلّ من النواة $^{4}_{2}He$ والنيوترون في التفاعل الموضح وفق (المعادلة 31 – 8جـ)، هي حوالي 3.5 MeV و14 MeV على الترتيب. هل هذه القيم الثابتة لا تعتمد على درجة حرارة البلازما؟

33. (II) افرض أنّ مفاعل اندماج يعمل باستخدام تفاعلات (d-d) المبيّنة في (المعادلات 31 – 8 أ، ب). احسب كم سنحتاج من الماء كوقود في الساعة لتشغيل مفاعل قدرته 1000-MW. افرض أنّ الكفاءة 30%.

34. (III) كم الطاقة (بالجول) المحتواة في 1.00 kg من الماء إذا استخدم الديتيريوم الطبيعي فيه في التفاعل الاندماجي الموضح في (المعادلة 31 – 8 أ) ؟ قارن بالطاقة الناتجة من حرق 1.0 kg من الكازولين والتي تساوي 5×10^{7} J تقريبًا.

35. (III) يعتقد أنّ الطاقة الناتجة من النجوم المتكتلة تنتج من حلقة الكربون – كربون (انظر الشرح). (أ) وضح أنه لا يُستهلك كربون في هذه الحلقة، وأنّ التأثير الكلي يشابه التأثير الناتج من حلقة البروتون – بروتون. (ب) ما الطاقة الكلية الناتجة؟ (جـ) لماذا تحتاج حلقة الكربون إلى درجة حرارة $(\approx 2 \times 10^{7}$ K) أعلى منها للحلقة البروتون–بروتون $(\approx 1.5 \times 10^{7}$ K)؟

36. (III) (أ) قارن الطاقة التي نحتاج إليها للتفاعل الأول في حلقة الكربون مع التي نحتاج إليها لتفاعل (الديتيريوم – تريتيوم) في (المثال31 - 9).(ب) إذا احتاج تفاعل الديتيريوم – تريتيوم إلى درجة $T \approx 3 \times 10^{8}$ K.احسب درجة الحرارة التي نحتاج إليها للتفاعل الأول في حلقة الكربون.

31 – 5 قياس الإشعاع – قياس الجرعات الإشعاعية

37. (I) تعدّ جرعة من أشعة جاما مقدراها 4.0 Sv في فترة زمنية قصيرة مميتة لنصف الناس الذين يتعرضون لها. ما مقدار هذه الجرعة بالجري؟

38. (I) بدلالة الدمار البيولوجي، كم رادا (rads) من الأشعة السينية (X) يكافيء 50 رادا (rads) من إشعاعات ألفا؟

39. (I) كم رادًا (rads) من النيوترونات البطيئة يعمل الدمار البيولوجي نفسه الذي يعمله 75 rads من النيوترونات السريعة؟

40. (I) كم مقدار الطاقة المترسبة في جسم شخص بالغ كتلته 65-kg عندما يتعرض لجرعة مقدارها 2.0-Gy؟

41. (II) حقنت عينة من $^{32}_{15}P$ شدة النشاط الإشعاعي لها 0.025-μCi في حيوان من أجل دراسة لتتبع الأثر الإشعاعي. إذا كان عداد جايجر يمر به 25% من جُسيمات β المنبعثة. ما معدل العدّ على اعتبار أنّ الكفاءة 85%؟

42. (II) يُعالَج مصاب بالسرطان إشعاعيًا بحيث تسقط حزمة من البروتونات التي طاقتها 1.2 MeV على ورم سرطاني كتلته 0.25-kg.(أ) إذا كان المصاب يستقبل جرعة فاعلة مقدارها 1.0 rem، فما هي الجرعة الممتصة؟(ب) كم عدد البروتونات التي يمتصها الورم السرطاني؟ افرض أنّ QF ≈ 1.

43. (II) مصدر مشعّ من $^{32}_{15}P$ (في $NaHPO_4$) شدة نشاطه الإشعاعي 1.0-mCi، يعطي إشعاعات β، زرع في ورم سرطاني بحيث يعطي 36 Gy. إذا كان عمر النصف للنظير $^{32}_{15}P$ يساوي 14.3 days وإذا كانت 1 mCi تعطي حوالي 10 mGy/min. فما الوقت التقريبي الذي يجب أن يبقى فيه المصدر مزروعًا في الورم السرطاني؟

44. (II) نحتاج إلى حوالي 35 eV لإنتاج زوج واحد من الأيونات في الهواء. بيّن أنّ هذا متوافق مع تعريفي الرونتجن المبينين سابقًا في الشرح.

45. (II) $^{57}_{27}Co$ يشع 122-keV من أشعة γ. إذا ابتلع شخص كتلته 70-kg مقدار 1.85 μCi من $^{57}_{27}Co$. ما معدل الجرعة الإشعاعية (Gy/day) للجسم كلّه بالمتوسط؟ افرض أنّ 50% من أشعة γ تترسب في الجسم. [مساعدة: احسب معدل الطاقة المترسبة في الجسم، ثم استخدم تعريف الجري (gray)].

46. (II) ما كتلة $^{14}_{6}C$ التي تعطي نشاطًا إشعاعيًا شدته 1.00-μCi؟

47. (II) تحررت كمية هائلة من النظير المشع $^{131}_{53}I$ في حادثة تشيرنوبل عام 1986. كيميائيًا، يذهب اليود إلى الغدة الدرقية عند الإنسان. (يُستعمل من قِبَل الأطباء لتشخيص مشاكل الغدة الدرقية). في الوضع الطبيعي، امتصاص يمكن أن يسبب دمارًا للغدة الدرقية. (أ) اكتب معادلة انحلال $^{131}_{53}I$. (ب) إذا كان عمره النصفي 8.0d، فكم الوقت المستغرق بعد حقن $^{131}_{53}I$ ليصبح 10% من قيمته الأصلية؟(جـ) قد يكون امتصاص 1 mCi من $^{131}_{53}I$ ضارًا. ما كتلة اليود هذه؟

48. (III) لو افترضنا أنّ النشاط الإشعاعي للترِ من الحليب 2000 pCi بسبب وجود $^{40}_{19}K$. إذا شرب شخص كأسين (0.5 L) من الحليب يوميًا، فاحسب الجرعة المؤثرة الكلية (بوحدتي Sv و rem) التي يستقبلها في سنة. كما في نموذج كرود، افرض أنّ الحليب يبقى في المعدة 12 hr، ومن ثمَّ يتحرر. افرض (بتقريب كبير) أنّ 10% من 1.5 MeV المتحررة لكلّ تحلل تمتصّ من الجسم. قارن نتائجك بالجرعة الطبيعية المسموحة وهي 100 mrem في السنة، أجرِ حساباتك لــ : (أ) شخص بالغ كتلته 50-kg. (ب) طفل كتلته 5-kg.

49. (III) يعدّ غاز الرادون $^{222}_{86}Rn$ خطرا حقيقيًا على الصحة (انظر الشرح) وينحلّ بأشعة α : (أ) ما هي الأنوية الناتجة من التحلّل؟ (ب) هل الأنوية الناتجة مستقرة أم مشعة؟ (جـ) هل الأنوية الناتجة غازات نبيلة، أم أنها قابلة للتفاعل كيميائيًا؟ (د) لو افترضنا أنّ 1.0 ng من $^{222}_{86}Rn$ تتسرب إلى الدور السفلي، فماذا ستكون شدة نشاطها الإشعاعي؟ إذا أغلق الدور السفلي بعد ذلك بإحكام، فماذا ستكون شدة النشاط الإشعاعي بعد مرور شهر واحد؟ [مساعدة: انظر الشكل 30 - 11].

31 – 9 الرنين النووي المغناطيسي (NMR)

50. (II) احسب الطول الموجي للفوتونات التي نحتاج إليها لإنتاج انتقال NMR لبروتونات حرة في مجال مغناطيسي شدته 1.000-T. في أيّ مدى من الطيف يقع هذا الطول الموجي؟

مسائل عامة

51. اكتشف شادويك النيوترون بعد قذف نواة $^{9}_{4}Be$ بالقذيفة المعروفة آنذاك وهي جسيم ألفا: (أ) إذا كان أحد نواتج التفاعل هو النيوترون المجهول، فماذا سيكون الناتج الثاني؟ (ب) ما هي القيمة Q لهذا التفاعل؟

52. درجات حرارة الاندماج النووي تعطي عادة بوحدة keV. أوجد معامل التحويل من كلفن إلى keV باستخدام المعادلة المعروفة في هذا المجال $\overline{KE} = kT$ دون المعامل $\frac{3}{2}$.

53. إحدى طرق تخصيب اليورانيوم هي باستخدام انتشار غاز UF_6 خلاله. احسب نسبة سرع الجزيئات لهذا الغاز الذي يحوي $^{235}_{92}U$ و $^{238}_{92}U$، والذي تعتمد عليه هذه العملية.

54. ما كتلة $^{235}_{92}U$التي استخدمت فعليًا للانشطار في أول قنبلة ذرية، والتي كانت طاقتها تكافئ الطاقة الناتجة من عشرين كيلو طن من TNT (كيلو طن واحد يعطي 5×10^{12}J)؟

55. متوسط الإشعاع السنوي الذي تتعرض له قرية ما يتكون من 21 mrad من أشعة X، وأشعة γ بالإضافة إلى 3.0 mrad من جُسيمات لها QF يساوي 10. ما معدّل rem السنوي الذي يستقبله ؟

56. يشكّل الديتيريوم نسبة 0.0115% من الهيدروجين بالمتوسط. قدّر كمية الديتيريوم الكلية في محيطات الأرض، ثم احسب الطاقة الكلية الناتجة إذا استخدمت هذه الكمية كلّها في مفاعل اندماجي.

57. يعطي مصدر مغلّف لأشعة γ جرعة إشعاعية بمعدل 0.052 rad/h على مسافة 1.0 m لشخص متوسط الحجم. إذا كان مسموحًا للعامل بجرعة إشعاعية مقدارها 5.0 rem في السنة الواحدة. فما المسافة التي يجب أن يعمل عندها بعيدًا عن المصدر إذا كان يعمل 40-h في الأسبوع؟ افرض أنّ شدة الإشعاع تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة. (في الواقع، تقلّ بسرعة أكبر من $1/r^2$ بسبب الامتصاص في الهواء، والقيمة التي ستحصل عليها ستكون أفضل من القيمة المسموحة.)

58. يتشكل غاز الرادون $^{222}_{86}Rn$ من انحلال α:(أ) اكتب معادلة الانحلال. (ب) أهمل الطاقة الحركية للأنوية الناتجة (لأنّ كتلها كبيرة) واحسب الطاقة الحركية لجسيم α الناتج. (جـ) احسب كمية الحركة (الزخم) للأنوية الناتجة ولجسيم α. (د) احسب الطاقة الحركية للأنوية الناتجة، وبيّن أنّ التقدير الذي عملته في الفرع (ب) صحيح.

59. لديك نظام لإنتاج الطاقة النووية ينتج 3400 MW: (أ) ما الكتلة الكلية لوقود اليورانيوم $^{235}_{92}U$ التي نحتاج إليها لتشغيل هذا النظام سنة كاملة إذا علمت أن كل عملية انشطار تنتج 200 MeV؟(ب) عادة، 6% من أنوية $^{235}_{92}U$ تنشطر (لتنتج $^{90}_{38}Sr$)، والتي تنحلّ بدورها عن طريق فقدان أشعة بأشعة β^- بعمر نصف مقداره 29 سنة. ما شدة النشاط الإشعاعي الكلية التي يصدرها $^{90}_{38}Sr$ في سنة؟ (أهمل حقيقة أنّ بعضها ينحلّ في سنة؟).

60. في التفاعل الموضح في (المعادلة 31 – 7) لحلقة البروتون – بروتون في الشمس، تنفلت النيوترينوات من الشمس بطاقة تساوي 0.5 MeV تقريبًا. في حين تبقى الطاقة المتبقية 26.2 MeV متوافرة في الشمس. استخدم هذه القيمة لحساب "حرارة الاحتراق" لكلّ كيلو جرام من وقود الهيدروجين، وقارنها بحرارة احتراق الفحم التي تساوي 3×10^7 J/kg تقريبًا.

61. تصل الطاقة إلى الأرض من الشمس بمعدل 1400 W/m^2 تقريبًا. احسب: (أ) القدرة الكلية الخارجة من الشمس. (ب) عدد البروتونات المستهلكة لكلّ ثانية في التفاعل الموضح في (المعادلة 31 - 7) على افتراض أنّ هذا هو مصدر الطاقة الشمسية كلّها.(جـ) افرض أنّ كتلة الشمس التي تساوي 2.0×10^{30} kg هي كلّها في الأصل من البروتونات، وكلّها تستهلك في التفاعلات النووية في قلب الشمس، فكم من الوقت تتوقع أن تبقى الشمس تشعّ بالمعدل الحالي؟ انظر التمرين السابق.

62. قد تبدأ بعض النجوم في مراحل سابقة من نشوئها باندماج نواتين من $^{12}_{6}C$ لتكوين نواة $^{24}_{12}Mg$: (أ) ما مقدار الطاقة الناتجة من هذا التفاعل؟(ب) ما الطاقة الحركية التي يجب أن تمتلكها ذرتا الكربون عندما تكونان بعيدتين عن بعضهما إذا كانتا تقتربان من بعضهما بعضا مسافة 6.0 fm تقريبا من المركز للمركز؟ (جـ) تقريبًا، كم درجة الحرارة التي يحتاج إليها هذا التفاعل؟

63. يحوي جسم شخص بالغ متوسط الحجم حوالي 0.10 μCi من $^{40}_{19}K$ يأتي من الطعام: (أ) كم عدد الانحلالات في الثانية الواحدة؟ (ب) ينتج انحلال البوتاسيوم جُسيمات بيتا بطاقة حوالي 1.4 MeV. احسب الجرعة الإشعاعية في السنة لشخص بالغ كتلته 50-kg. هل هذه النسبة مقبولة مقارنة بالنسبة 3.6 mSv/year المكتسبة دون خطورة؟

64. عندما وقع حادث المفاعل النووي في تشيرنوبل عام 1986، انبعث 2.0×10^7 Ci إلى الجو. افرض أنّ هذا الإشعاع قد توزع بانتظام على سطح الأرض، ما شدة النشاط الإشعاعي لكلّ متر مربع؟ (شدّة النشاط الإشعاعي غير منتظمة في الواقع؛ حيث تعرضت المناطق الجافة في أوروبا إلى إشعاع أكثر من المناطق الممطرة).

65. يحوي نجم كمية كبيرة من الهيليوم الذي يستهلك حسب المعادلة $^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C$. ما هي القيمة Q لهذا التفاعل؟

66. مصدر مشع من $^{137}_{55}Cs$ شدة نشاطه الإشعاعي له 1.0-μCi استخدم لمدة 2.0 h بواسطة طالب كتلته 75-kg في مختبر فيزياء. $^{137}_{55}Cs$ ينحلّ بواسطة انبعاث β^- بعمر نصف مقداره 30 سنة. متوسط الطاقة لأشعة بيتا المنبعثة حوالي 190 keV لكلّ تحلل. افرض أنّ الطالب يمتص الطاقة المنبعثة كلّها β، فما هي الجرعة المؤثرة (بوحدة rem) التي يستقبلها خلال عمله في المختبر؟

67. انبعثت كمية كبيرة من النظير $^{90}_{38}Sr$ خلال حادث المفاعل النووي في تشيرنوبل عام 1986. يدخل $^{90}_{38}Sr$ إلى الجسم من خلال سلسلة الطعام. ما الوقت المستغرق في انحلال 90% من أنوية $^{90}_{38}Sr$ المنبعثة خلال الحادث؟ انظر الملحق B.

68. ثلاثة مصادر مشعة لها شدة النشاط الإشعاعي نفسها. 25 mCi المصدر A يبعث 1.0-MeV من أشعة γ، أما المصدر B فيبعث 2.0-MeV من أشعة γ ، في حين يبعث المصدر 2.0-MeV من أشعة ألفا. ما الخطر النسبي لهذه المصادر؟

69. يريد مريض كتلته 70-kg عمل فحص طبي عن طريق حقنه بالنظير $^{99m}_{43}Tc$ (البند 31 - 7) الذي ينحلّ ببث أشعة جاما طاقتها 140-keV. عمر النصف لهذا الانحلال 6 ساعات. افرض أنّ حوالي نصف فوتونات جاما تجتاز الجسم دون أن تتفاعل مع أيّ شيء. كم يجب أن تكون شدة النشاط الإشعاعي الابتدائية لعينة Tc إذا كانت الجرعة الكلية للجسم لا تستطيع تجاوز 50 mrem؟ اعمل حسابات تقريبية على افتراض أنّ التأثيرات البيولوجية يمكن إهمالها.

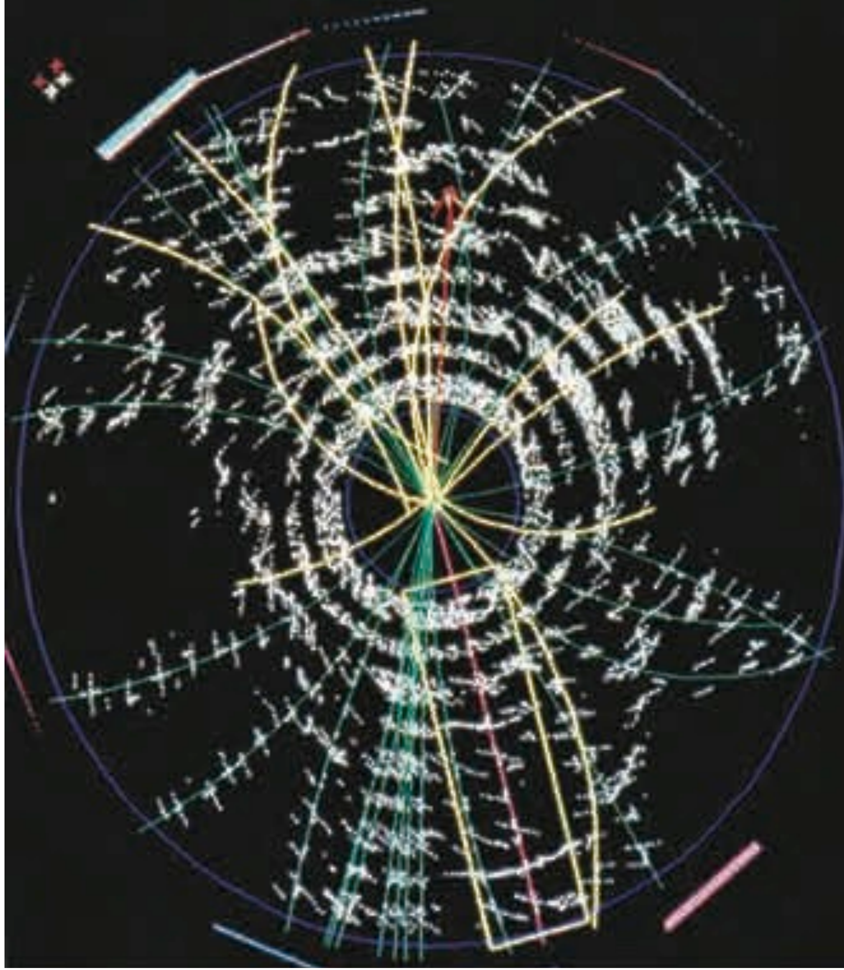
إجابات التمارين

أ: $^{138}_{56}Ba$

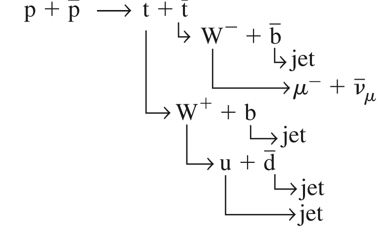
ب: ثلاثة نيوترونات

جـ: 2×10^{17}

تمثّل هذه الصورةُ التي أُعيد بناؤها حاسوبيًّا تصادمَ البروتون مع ضديد البروتون الذي حدث في مختبر فيرمي (الشّكل 32-3) عند طاقة مشتركة تساوي 2 TeV تقريبًا. يُعدّ هذا التصادم أحد الوقائع التي تعطي دليلًا على وجود الكوراك الذي يُسَمّى قمة (1995) . توضع الغرفة الانسياقية نحو السلك (البند 30-13) في مجال مغناطيسي، ويمثّل نصفُ قطر الانحناء لمسارات الجُسيم المشحون مقياسًا لكمية التحرك لكلّ جُسيم (الفصل 20). في حين تمثّل النقاطُ البيضاء الأسلاكَ الكهربائية للغرفة الانسياقية (16-v 30). أمّا الخطوط الملونة فهي مسارات الجُسيم.



إنّ مدة حياة كوراك قمة (t) قصيرة جدًا $(\approx 10^{-23}\,\mathrm{s})$ وبالتالي يصعب كشفها مباشرة. لذا، علينا البحث عن النواتج المحتملة للاضمحلال. تشير عملية التحليل إلى التفاعل التالي والاضمحلال المتعاقب للنواتج.



تشتمل الصورة أيضًا على فيض من الجُسيمات (مجموعات من الجُسيمات تتحرك تقريبًا بالاتجاه نفسه) وميون (μ^-) مساره هو الأحمر الورديّ المحصور بمستطيل أصفر كي يكون بارزًا. بعد قراءة هذا الفصل، حاول تسمية كلّ رمز من الرموز أعلاه، وعلّق على قوانين الحفظ جميعها: هل تحققت أم لا.

الفصل 32

الجُسيمات الأوّليّة

سنناقش في هذا الفصل والذي يليه في هذا الكتاب موضوعين من أكثر المواضيع إثارة في الفيزياء المعاصرة هما: الجُسيمات الأولية في هذا الفصل، والكونيات وفيزياء الفلك في (الفصل 33). ويعدّ هذان الفصلان في مقدمة المعارف الإنسانية؛ حيث تعالج الجُسيمات الأولية أصغر الأجسام في الكون، في حين تعالج الكونيات أكبر (وأقدم) ميزات الكون. إنّ القارئ الذي يريد فهم الجماليات العظيمة للعلوم المعاصرة — و/ أو يريد أن يكون مواطنًا صالحًا — سوف يرغب بقراءة هذين الفصلين حتى لو لم يكن هناك وقت لقراءتهما ضمن منهاج الفيزياء.

سنناقش في هذا الفصل - قبل الأخير- من الكتاب فيزياءَ *الجُسيمات الأولية* التي تمثّل محاولة الجنس البشري في فهم لبنات البناء الأساسية للمادة. لقد كان معروفًا في منتصف ثلاثينيّات القرن الماضي أنّ الذرات جميعها يمكن أن تكون مكونة من نيوترونات، وبروتونات، وإلكترونات. كما أنّ المكونات الأساسية للكون لم تعد تعتبر الذرات ولكنها بالأحرى البروتون والنيوترون والإلكترون. إضافة إلى هذه الجُسيمات الأولية الثلاثة، هناك أيضًا جُسيمات عديدة أخرى معروفة هي: البوزيترون (إلكترون موجب)، والنيوترينو، وجُسيم γ (أو الفوتون) لتشكل ما مجموعه ستة جُسيمات أولية.

وفي خمسينيّات وستينيّات القرن الماضي، تمّ اكتشاف أنواع جديدة وكثيرة من الجُسيمات التي تشبه النيوترون والبروتون، بالإضافة إلى جُسيمات كثيرة متوسطة الحجم تُسَمّى *ميزونات*، والتي كتلها في الأغلب أقلّ من كتل النيوكلونات ولكنها أكثر من كتلة الإلكترون. شعر الفيزيائيون أنه لا يمكن أن تكون هذه الجُسيمات كلّها أساسية، ويجب أن تكون مؤلفة من مكونات أصغر منها بكثير، سُميت *كواركات*.

في الوقت الحاضر، تعدّ **الكواركات** المكونات الأساسية للمادة (تتكون كلّ من البروتونات، والنيوترونات والأنوية الذرية، والميزونات من كواركات) بالإضافة إلى الليبتونات (مجموعة تشتمل على الإلكترونات، والبوزيترونات والنيوترينات)، إلى جانب أنّ هناك أيضًا حاملات القوة التي تضم *الغلونات* والفوتونات. تُسَمّى النظرية التي تصف نظرتنا الحالية بـ "**النموذج المعياري**". إنّ كيفية التوصّل إلى فهمنا الحاضر للجُسيمات الأولية هو موضوع هذا الفصل.

أحد التطورات الحديثة والمثيرة التي ظهرت خلال السنوات القليلة الماضية هو التركيب الذي نشأ بين دراسة الجُسيمات الأولية وفيزياء الفلك (الفصل 33). في الحقيقة، تشير المشاهدات الحديثة في فيزياء الفلك إلى نتيجة مفادها أنّ الجزء الأكبر من محتوى الكون من "الكتلة – الطاقة ليس المادة العادية، ولكنه مكون من شكلين غامضين ومخفيين هما: المادة المعتمة والطاقة المعتمة اللتين لا يمكن شرحهما من خلال النموذج المعياري في شكله الحالي.

1-32 جُسيمات الطاقة العالية والمسارعات

في السنوات التي تلت الحرب العالمية الثانية، وجد أنّه إذا كان للجسم الساقط في تفاعل نووي طاقة كافية، فإنّ أنواعًا جديدة من الجُسيمات يمكن أن تنتج. استخدمت في التجارب المبكرة **الإشعاعات الكونية**، وهي جُسيمات تصطدم بالأرض من الفضاء الخارجي. أما في المختبر، فقد بُنيت مسارعات لتعجيل البروتونات والإلكترونات، على الرغم من أنّ الأيونات الثقيلة قادرة على التّعجيل أيضًا. استخدمت **مسارعات الطاقة** هذه في سبر النواة بشكل أكثر عمقًا، وفي إنتاج جُسيمات جديدة ودراستها للحصول على معلومات عن القوى الأساسية ومكونات الطبيعة. وبما أنّ طاقات الجُسيمات المقذوفة عالية، فإنّ هذا المجال يُسَمّى أحيانًا **فيزياء الطاقة العالية**.

طول الموجة والتحليل

يمكن للجُسيمات المعجلة إلى طاقة عالية سبر ما في داخل الأنوية والنيوكلونات التي تصطدم بها. وهناك عامل مهم، وهو أنّ المقذوفات التي تتحرك بسرعات عالية يمكن أن توحي بتفاصيل أكثر. يعطى طول الموجة للجُسيمات المقذوفة بصيغة دي برولي للطول الموجي (المعادلة 27-8).

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (1\text{-}32)$$

طول موجة دي برولي

أي أنّه كلّما زادت كمية التحرك p للجُسيم المقذوف قلّ طوله الموجي. ناقشنا في (الفصل 25) الأجهزة البصرية، ولاحظنا أنّ تحليل تفاصيل الصور يحدده الطول الموجي: كلّما قلّ الطول الموجي، يمكن الحصول على تفاصيل أدقّ. هذا سبب واحد، تم في السنوات الماضية، من أسباب بناء مسارعات جُسيمات الطاقة العالية للوصول إلى عمق أكثر في تركيب المادة، إلى الحجم الأصغر فالأصغر.

المثال 1-32 دقة تحليل حزمة من الإلكترونات

ما الطول الموجي لحزمة من الإلكترونات طاقتها 1.3-GeV، وما التحليل المتوقع لها ؟

النهج: بما أنّ الطاقة 1.3 GeV أكبر بكثير من كتلة السكون للإلكترون، فيجب أن نتعامل مع سرعات نسبوية. نجد كمية التحرك للإلكترونات من (المعادلة 26-10)، والطول الموجي $\lambda = h/p$.

الحلّ: يمتلك كلّ إلكترون طاقة حركية تساوي $\text{KE} = 1.3\text{ GeV} = 1300\text{ MeV}$، وهي أكبر بحوالي 2500 من طاقة كتلة السكون للإلكترون ($0.51\text{ MeV}/c^2$) لذا، يمكننا إهمال الحدّ $(m_0c^2)^2$ في (المعادلة 26-10)، $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$، ونحلّها بالنسبة إلى p، لنحصل على:

$$p = \sqrt{\frac{E^2 - m_0^2c^4}{c^2}} \approx \sqrt{\frac{E^2}{c^2}} = \frac{E}{c}$$

وعليه، فإنّ طول موجة دي برولي يساوي

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

حيث $E = 1.3\text{ GeV}$، وهكذا فإنّ

$$\lambda = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\text{ m/s})}{(1.3 \times 10^{9}\text{ eV})(1.6 \times 10^{-19}\text{ J/eV})} = 0.96 \times 10^{-15}\text{ m}$$

أو تساوي 0.96 fm. هذا التحليل يساوي تقريبًا 1 fm، وهو من الرتبة نفسها لحجم الأنوية (انظر إلى المعادلة 30-1).

ملحوظة: إنّ القيمة القصوى للتحليل المحتمل لهذه الحزمة من الإلكترونات أكبر بكثير من حزمة ضوئية في الميكروسكوب الضوئي ($\lambda \approx 500\text{ nm}$).

التمرين أ: ما طول موجة بروتون طاقته الحركية $\text{KE} = 1.00\text{ TeV}$؟

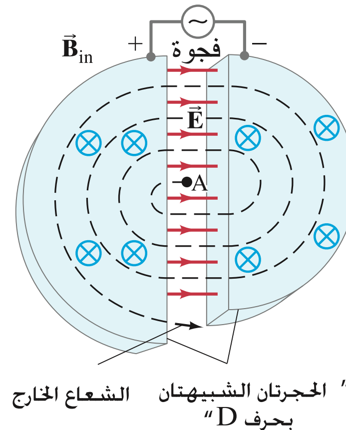
وهناك سبب رئيس آخر لبناء مسارعات الطاقة العالية هو أنّ جُسيمات جديدة كتلها أكبر يمكن أن تُنتج عند طاقات عالية. وتحوّل الطاقة الحركية للجُسيمات المتصادمة إلى جُسيمات أثقل عن طريق $E = mc^2$، كما سنرى لاحقًا. أمّا الآن، فسنناقش مسارعات الجُسيمات.

السيكلوترون

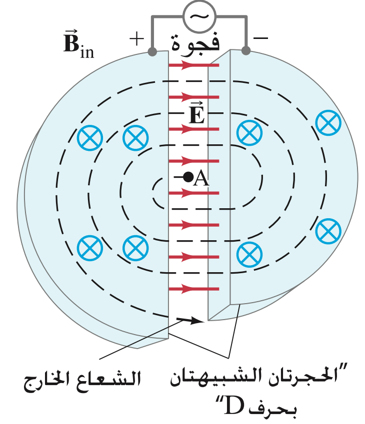


الشكل 32-1 أرنست لورنس عام 1930 يمسك بأول سيكلوترون (نلاحظ أنّ غرفة الفراغ تحيط به).

لقد تمّ تطوير السيكلوترون في عام 1930 من قبل العالم أرنست لورنس (1901 – 1958، الشّكل 32-1) في جامعة كاليفورنيا. يستخدم في السيكلوترون مجال مغناطيسي يجعل الأيونات المشحونة – عادة بروتونات – تتحرك في مسارات دائرية. وعلى الرغم من أنّ السيكلوترون البسيط لم يعد يستخدم من قبل علماء فيزياء الجُسيمات، إلا أنه يستخدم بشكل واسع في الطب لعلاج السرطان. كما أنّ مبدأ تشغيله مفيد لفهم السيكلوترون الحديث. تتحرك البروتونات في فراغ داخل تجويفين على شكل حرف D- كما هو موضح في (الشكل 32-2). تتسارع البروتونات في كلّ مرة تمرّ فيها خلال الفجوة التي بين التجويفين بسبب فرق الجهد بينهما (القوة الكهربائية) ممّا يؤدي إلى زيادة سرعة البروتونات، وبالتالي زيادة نصف قطر انحناء مساراتها في المجال المغناطيسي. وبعد دورات كثيرة، تكتسب البروتونات طاقة حركية عالية، وتصل إلى الحافة الخارجية للسيكلوترون حيث تصطدم بالهدف. تزداد سرعة البروتونات فقط عندما تكون في الفجوة التي بين التجويفين، حيث يجب أن يكون الجهد مترددًا. عندما تتحرك البروتونات إلى اليمين عبر الفجوة التي في (الشكل 32-2)، فإنّ التجويف الأيمن يجب أن يكون سالبًا كهربائيًا. أمّا التجويف الأيسر فيجب أن يكون موجبًا. وبعد نصف دورة، تتحرك البروتونات نحو التجويف الأيسر الذي يجب أن يكون سالبًا حتى يتمكن من تعجيلها.



الشكل 32-2 مخطط للسيكلوترون. يؤثر مجال مغناطيسي (داخل الصفحة) بواسطة مغناطيس كهربائي كبير. تبدأ البروتونات من النقطة A حيث مصدر الأيونات. إنّ خطوط المجال الموضحة في الشكل هي لمجال كهربائي متردد في الفجوة عند لحظة معينة.



الشكل 2-32 (مكرر)
مخطط للسيكلوترون

يجب أن يكون التردّد f للجهد المؤثر مساويًا لذاك الذي للبروتونات التي تدور في المسار الدائري. عندما تدور أيونات شحناتها q في التجويف، فإنّ القوة المحصلة F التي تؤثر في كلّ واحد منها تنشأ من المجال المغناطيسي B. لذا، فإنّ $F = qvB$، حيث v سرعة الأيون في لحظة ما (المعادلة 20-4). إنّ القوة المغناطيسية عموديّة على كلّ من $\vec{\mathbf{v}}$ و $\vec{\mathbf{B}}$ مما يجعل الأيونات تتحرك في مسارات دائرية. وهكذا، فإنّ التسارع داخل التجويفين يكون مركزيًّا ويساوي v^2/r، حيث r نصف قطر المسار الذي يتحرك فيه الأيون عند لحظة ما. وباستخدام قانون نيوتن الثاني $F = ma$، سنجد أنّ:

$$F = ma$$
$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

وذلك عندما تكون البروتونات داخل التجويفين (وليست في الفجوة). وعليه

$$v = \frac{qBr}{m}$$

يُسَمّى الزمنُ اللازم لإتمام دورة واحدة الزمنَ الدوريّ T ويساوي

$$T = \frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}} = \frac{2\pi r}{qBr/m} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وهكذا، فإنّ تردد الدوران f يساوي

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \qquad \textbf{(2-32)}$$

وهذا هو ما يُسَمّى بتردد السيكلوترون

المثال 2-32 السيكلوترون

يعمل سيكلوترون صغير القيمة القصوى لنصف قطره $R = 0.25\ \text{m}$ على تعجيل بروتونات في مجال مغناطيسي شدته 1.7-T. احسب: (أ) التردد اللازم للجهد المتردد المؤثر. (ب) طاقة حركة البروتونات عندما تغادر السيكلوترون.

النهج: إنّ تردد البروتونات التي تدور داخل التجويفين (المعادلة 2-32) يجب أن تساوي تردد الجهد المؤثر عبر الفجوة لتزداد سرعة البروتونات.

الحلّ: (أ) من (المعادلة 2-32)، نحصل على

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$
$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(1.7\ \text{T})}{(6.28)(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})} = 2.6 \times 10^{7}\ \text{Hz} = 26\ \text{MHz}$$

وتقع هذه القيمة ضمن منطقة أمواج الراديو من الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل 22-8).
(ب) تغادر البروتونات السيكلوترون عند $r = R = 0.25\ \text{m}$. من العلاقة $qvB = mv^2/r$، نحصل على $v = qBr/m$. وبالتالي نجد أنّ

$$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\frac{q^2B^2R^2}{m^2} = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$
$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})^2(1.7\ \text{T})^2(0.25\ \text{m})^2}{(2)(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})} = 1.4 \times 10^{-12}\ \text{J} = 8.7\ \text{MeV}$$

أي أنّ طاقة الحركة أقل بكثير من طاقة كتلة السكون للبروتون (938 MeV) ولسنا بحاجة إلى تطبيق نظرية النسبية.

ملحوظة: لا يؤثر مقدار الجهد المؤثر بين التجويفين في الطاقة النهائية. ولكن، كلّما زاد هذا الجهد، قلّ عدد الدورات اللازمة لإعطاء البروتونات الطاقة الكاملة.

الميزة المهمة للسيكلوترون هي أنّ تردد الجهد المؤثر- كما في (المعادلة 2-32)، لا يعتمد على نصف قطر r المسار الدائري للجُسيم. ولهذا فإنّ التردد لا يتغير عندما تخرج البروتونات أو الايونات من المصدر، ثم تتسارع في مسارات تتزايد أنصاف أقطارها أكبر فأكبر.

ولكن هذا صحيح فقط بالنسبة إلى الطاقات التي لا تخضع لنظرية النسبية. أمّا عند السرعات العالية، فإنّ كمية التحرك (المعادلة 26-4) تساوي $p = m_0 v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ لذا، نضع مكان m التي في المعادلة 32-2 الكمية γm_0 ويعتمد تردد السيكلوترون f (المعادلة 32-2) على السرعة v. ولجعل الجُسيمات متزامنة؛ تستخدم آلة تُسَمّى **سنكروسيكلوترون** لتقليل التردد، بموازاة زيادة الكتلة لنحصل على حزمة من الجُسيمات المشحونة تزداد سرعتها وكتلتها في المدارات الكبيرة.

السنكروتون

السنكروترون

هناك طريقة أخرى لتسريع الجُسيمات النسبية بزيادة المجال المغناطيسي B مع الزمن حتى يبقى التردد f (المعادلة 32-2) ثابتًا كلما زادت سرعة الجُسيمات. تُسَمّى مثل هذه الأجهزة السنكروترون، وهي في الوقت الحاضر يمكن أن تكون ضخمة.

في المركز الأوروبي للأبحاث النووية (CERN) في جنيف، سويسرا، سيكون نصف قطر السنكروترون الجديد (2007) حوالي 4.3 km، ويعجل البروتونات إلى طاقة 7 TeV. أما نصف قطر مسارع تيفاترون في مختبر فيرمي (مختبر فيرمي القومي) فهو 1.0 km. يستخدم مسارع تيفاترون مغانط فائقة الموصلية لتعجيل البروتونات إلى طاقة تصل إلى حوالي $1000\ \text{GeV} = 1\ \text{TeV}$ (ومن هنا جاء الاسم) حيث $1\ \text{TeV} = 10^{12}\ \text{eV}$. يستخدم هذا السنكروترون الكبير حلقة ضيقة من المغانط (انظر إلى الشكل 32-3) حيث يوضع كلّ مغناطيس عند نصف القطر نفسه من مركز الدائرة. تفصل بين المغانط فجوات، حيث يعمل الجهد المرتفع على تعجيل الجُسيمات. وهناك طريقة أخرى لوصف التعجيل هي أنّ الجُسيمات تطفو مثل زبد على موجة كهرومغناطيسية تتحرك داخل تجويفات تردد الراديو (RF).

الشكل 32-3 (أ) منظر جوي لمختبر فيرمي في بتافيا، إلينوي، المسارع الرئيس عبارة عن حلقة دائرية نصف قطرها 1.0 km. (ب) نفق المسارع الرئيس في مختبر فيرمي من الداخل. حلقة المغانط العلوية هي للمسارع 500-GeV القديم. في الأسفل، حلقة مغانط فائقة الموصلية لمسارع تيفاترون 1-TeV.



(أ)



(ب)

يجب أن تتحرك الجُسيمات المشحونة في مسار دائري نصف قطره ثابت عندما تُحقن. ويتم إنجاز ذلك بتزويد الجُسيمات بطاقة كبيرة بداية في مسارع أصغر (يُسَمّى مِحْقَن)، ثم يزداد المجال المغناطيسي ببطء عندما تزداد سرعته في السنكروترون الكبير.

إشعاع السنكروترون

المشكلة الوحيدة في أيّ مسارع هو أنّ الشحنات الكهربائية المتسارعة تُشِعّ طاقة كهرومغناطيسية (انظر إلى الفصل 22). وبما أنّ الأيونات والإلكترونات تعجل في المسارع، فإنّنا نتوقع فقدان مقدار كبير من الطاقة عن طريق الإشعاع. يزداد هذا التأثير مع زيادة الطاقة، ويكون مهمّا خصوصًا في المسارعات الدائرية حيث يؤثر التسارع المركزي، كما في السنكروترون، ولذلك تُسَمّى **إشعاع السنكروترون**. وعلى أيّ حال، قد يكون إشعاع السنكروتون مفيدًا. أحيانًا، تكون هناك حاجة إلى حزم مركزة من الفوتونات، يتمّ الحصول عليها من تعجيل الإلكترون بواسطة السنكروترون.

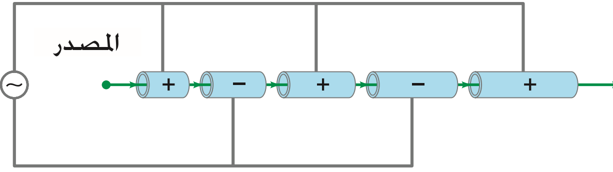
المسارعات الخطّيّة

ليناك

تعجّل الإلكترونات أو الايونات في **المسارع الخطّيّ** في مسار أو خطّ مستقيم مارة خلال موصلات أنبوبية كما في (الشكل 32-4 أ). الجهد المؤثر في الأنابيب متردد بحيث عندما تصل الإلكترونات (مثلاً) إلى فجوة ما، فإنّ الأنبوب الذي أمامها يكون موجبًا، في حين يكون الأنبوب الذي غادرته للتّوّ سالبًا. وعند السرعات المنخفضة، تقطع الجُسيمات مسافة أقلّ خلال الفترة الزمنية نفسها. لذا، تكون الأنابيب في البداية قصيرة. وبما أنّ كتلة الإلكترونات قليلة، فإنها تقترب من سرعة الضوء $v \approx c$ بشكل سريع، وتكون الأنابيب متساوية تقريبًا في الطول. وتعدّ المسارعات الخطية مهمة خصوصًا لتعجيل الإلكترونات بسبب غياب إشعاع السنكروترون. إنّ أكبر مسارع خطّيّ للإلكترونات موجود في ستانفورد (مركز المسارع الخطي في ستانفورد، أو SLAC) كما في (الشكل 32-4 ب). يبلغ طول هذا المسارع حوالي 3 km (2 mi) ويمكنه تعجيل الإلكترونات إلى طاقة تصل 50 GeV. وتحتوي العديد من المستشفيات على مسارعات خطية للإلكترونات التي تسقط بطاقة 10-MeV على شريحة فلزية لتنتج فوتونات أشعة جاما لتشعّع بها الأورام.



(ب)



(أ)

الشكل 32-4 (أ) مخطط بياني لمسارع خطّيّ بسيط. (ب) صورة للمسارع الخطّيّ في ستانفورد (SLAC)/ كاليفورنيا.

الحزم المتصادمة

المصادمات

يمكن إجراء تجارب فيزياء الطاقة العالية عن طريق السماح لحزمة من الجُسيمات بالارتطام بهدف ثابت. وللحصول على القيمة القصوى لطاقة التصادم المحتملة من مسارع ما؛ يتم تعجيل حزمتين من الجُسيمات إلى طاقة عالية جدًا، ثم توجهان ليحدث لهما تصادم رأسيّ مباشر. وهناك طريقة واحدة للحصول على **حزمتي التصادم** من مسارع واحد باستعمال **حلقات التخزين**، التي يمكن من خلالها جعل الحزم التي تدور عكس بعضها أن تتصادم بشكل متكرر عند نقطة معينة. على سبيل المثال، في التجارب التي أعطت الدليل القوي على وجود كوارك قمة (انظر إلى الصورة الافتتاحية للفصل والبند 32-9) تمّ في مختبر فيرمي تعجيل كلّ من البروتونات والبروتونات المضادة إلى طاقة 900 GeV للبحث تصل الطاقة المشتركة الناتجة من التصادم الرأسي المباشر بينهما إلى 1.8 TeV. وقريبًا، سيكون أكبر جهاز من هذا النوع هو مصادم هادرون الكبير (LHC)، في سيرن CERN قرب جنيف، حيث يبلغ محيطه 26.7 km (الشكل 32-5) ومن المتوقع أن يكتمل العمل به في عام 2007 تقريبًا. كلٌّ من الشعاعين المتصادمين يحمل بروتونات ذات طاقة 7 تيرا الكترون فولت 7-TeV ليكون اجمالي طاقة التفاعل يساوي 14 TeV.



(الشكل 32-5) تمثّل الدائرة الكبيرة موضع النفق الذي يقع على عمق 100 m تحت الأرض في سيرن (قرب جنيف) على الحدود بين فرنسا وسويسرا، والذي سيكون مقر LHC. توضح الدائرة الأصغر موضع السنكروترون العملاق للبروتون الذي سيستخدم لتعجيل البروتونات قبل حقنها في LHC.

المثال 32-3 سرعة بروتون طاقته 1.0-TeV.

ما سرعة بروتون ينتج بطاقة 1.0-TeV في مختبر فيرمي؟

النهج: الطاقة الحركية $\mathrm{KE} = 1.0\,\mathrm{TeV} = 1.0 \times 10^{12}\,\mathrm{eV}$ وهي أكبر بكثيرٍ من طاقة كتلة السكون للبروتون التي تساوي $0.938 \times 10^{9}\,\mathrm{eV}$. لذا، يجب استخدام الحسابات النسبية. وبشكل خاص، سنستخدم (المعادلة 26-6).

$$\mathrm{KE} = (\gamma - 1)m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2$$

الحل: مقارنة مع الطاقة الحركية $\mathrm{KE}\ 1.0 \times 10^{12}\,\mathrm{eV}$ للبروتون، يمكن إهمال طاقة كتلة السكون $(\approx 10^{-3}\,\mathrm{TeV})$. وعليه، يمكننا كتابة

$$\mathrm{KE} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ثم

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{m_0c^2}{\mathrm{KE}}\right)^2$$

أو

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0c^2}{\mathrm{KE}}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{938 \times 10^6\,\mathrm{eV}}{1.0 \times 10^{12}\,\mathrm{eV}}\right)^2}$$

$$v = 0.9999996c.$$

أي أنّ البروتون ينتقل بسرعة قريبة جدّا من سرعة الضوء c.

32-2 بدايات فيزياء الجُسيمات الأولية – تبادل الجُسيم

يُعتبر نموذج الجُسيمات الأولية المتفق عليه حاليّا أنّ *الكواركات واللبيتونات* هي المكونات الأساسية للمادة العادية. ولكي نفهم هذه الفكرة؛ سنحتاج إلى البدء بالأفكار التي أدت إلى صياغتها.*

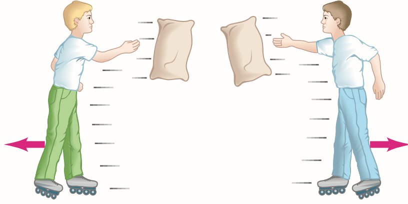
يمكن القول بأنّ فيزياء الجُسيمات الأولية قد بدأت بالظهور في عام 1935 عندما تنبأ الفيزيائي الياباني يوكاوا (1907-1981) بوجود جُسيم جديد يقوم بطريقة ما بدور الوسيط بالنسبة للقوة النووية القوية. ولفهم فكرة يوكاوا؛ سنتناول أولاً القوة الكهرومغناطيسية. رأينا عند دراستنا للكهرباء أنّ القوة الكهربائية تؤثر عن بعد دون حدوث تلامس. وحتى تدرك كيف تؤثر القوة عن بعد؛ فقد استخدمنا فكرة **المجال الكهربائي**. فالقوة الكهربائية التي يؤثر بها جُسيم مشحون في آخر تنتج بسبب المجال الكهربائي الذي يشكله الجُسيم الأول. وبصورة مشابهة تمامًا، يمكن القول بأنّ المجال المغناطيسي يحمل القوة المغناطيسية. ثم رأينا لاحقًا (الفصل 22) أنّ المجال الكهرومغناطيسي ينتقل خلال الفراغ على شكل موجات. وأخيرًا في (الفصل 27)، أوضحنا أنّ الإشعاع الكهرومغناطيسي (الضوء) يمكن اعتباره موجة أو مجموعة من الجُسيمات تُسَمّى *فوتونات*. وبسبب ازدواجية الموجة – جُسيم هذه، يمكن أن نتخيل بأنّ القوة الكهرومغناطيسية بين الجُسيمات المشحونة تنشأ بسبب ما يلي:

(1) المجال المغناطيسي الذي ينشأ من أحد الجُسيمات وتتأثر به الجُسيمات الأخرى.

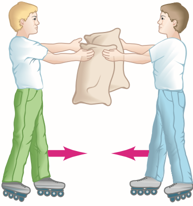
(2) تبادل الفوتونات (جُسيمات γ) فيما بينها.

والنقطة (2) هي التي نريد التركيز عليها هنا. يبين التناظر المقترح في (الشكل 32-6)، كيف يؤدي تبادل الجُسيمات إلى نشوء القوة؛ ففي الجزء (أ)، يبدأ الطفلان برمي وسادات ثقيلة على بعضهما، كلّ رمية وكلّ التقاط يؤدي إلى تراجع الطفل نحو الخلف بسبب الدفع، وهذا يكافئ قوة التنافر. ومن جهة أخرى، إذا تبادل الطفلان الوسادات بالتقاطها من يد الشخص الآخر، فإنّهما سينجذبان نحو بعضهما، تمامًا كتأثير قوة التجاذب.

الشكل 32-6 قوى مكافئة لتبادل الجُسيم. (أ) قوة تنافر (يرمي طفلان الوسادات على بعضهما). (ب) قوة تجاذب (يلتقط الطفلان الوسادات من أيدي بعضهما).

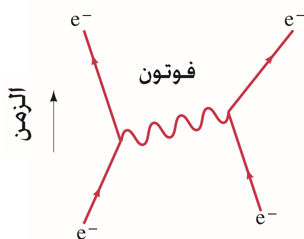


(أ) قوة تنافر (يرمي الطفلان الوسادات)



(ب) قوة تجاذب (يلتقط الطفلان الوسادات من أيدي بعضهما).

* ما أقوله اليوم لن يكون مناقشة علمية؛ ولكن تساعد على الفهم - انظر حاشية صفحة 769.



الشكل 32-7 يبين مخطط فايمان فوتون الذي يعمل كناقل للقوة الكهرومغناطيسية بين إلكترونين. هذا النوع من الرسم البياني يمثل x مقابل t مع ازدياد t في الاتجاه الرأسي. ابدأ من الأسفل، حيث يدنو إلكترونان من بعضهما بعضا (تقل المسافة بينهما مع مرور الزمن). وعندما يقتربان من بعضهما، يحدث تبادل للطاقة ولكمية التحرك من أحدهما إلى الآخر بواسطة فوتون (أو ربما بواسطة أكثر من فوتون) ويرتدان عن بعضهما بعضا.

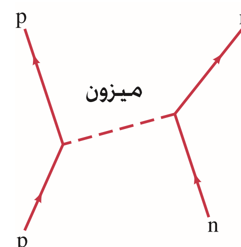
بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية فإنّ الفوتونات هي التي يتم تبادلها بين جُسيمين مشحونين، وتؤدي إلى ظهور القوة بينهما. المخطط البسيط الذي يصف عملية تبادل الفوتون هذه موضح في (الشكل 32-7). ويُسَمّى مثل هذا المخطط **"مخطط فايمان"** نسبة إلى مبتدعه، الفيزيائي الأمريكي ريتشارد فايمان (1918 – 1988)، بناء على **نظرية الكهروديناميكا الكمية** (QED).

الجزيئات التي تتوسط أو تحمل القوى.

يمثل (الشكل 32-7) الحالة الأسهل في نظرية الـ QED حيث يتم تبادل فوتون واحد. يصدر أحد الجُسيمين المشحونين الفوتون ويرتد نتيجة لذلك، في حين يقوم الجُسيم الآخر بامتصاص هذا الفوتون. في أيّ تفاعل أو تصادم يحدث انتقال للطاقة ولكمية التحرك من أحد الجُسيمين إلى الآخر عن طريق الفوتون. يُمتص الفوتون من قِبل الجُسيم الثاني مباشرة بعد أن يصدر من الجُسيم الأول ولا يمكن مشاهدته بعد ذلك. لذا، فإنه يُسَمّى فوتونا *افتراضيًا*، على عكس الفوتون الحرّ الذي يمكن الكشف عنه بواسطة الأجهزة. وهكذا يقال إنّ الفوتون وسيط، أو ينقل القوة الكهرومغناطيسية.

وبطريقة مماثلة لتبادل الفوتون كوسيط للقوة الكهرومغناطيسية، اقترح يوكاوا في النظرية التي أشرنا إليها سابقًا أنه يجب أن يكون هناك جُسيم وسيطا للقوة النووية القوية، أي القوة التي تجعل النيوكلونات داخل النواة متماسكة. أطلق يوكاوا على هذا الجُسيم اسم **ميزون** (تعني كتلة متوسطة). يبين (الشكل 32-8) مخطط فايمان الذي يوضح تبادل الميزون: ينقل الميزون القوة النووية بين نيوترون وبروتون.

تقدير كتلة الجُسيمات المتبادلة.



(الشكل 32-8) تبادل الميزون عندما يتفاعل بروتون ونيوترون من خلال القوة النووية القوية.

يمكننا عمل تقدير تقريبي لكتلة الميزون كما يلي: افرض أنّ البروتون الذي إلى الجهة اليسرى في (الشكل 32-8) ساكنًا. حتى يُصدِر هذا البرتون ميزونا فإنه يحتاج إلى طاقة (لعمل كتلة الميزون) تأتي من لا مكان، ما يؤدي إلى انتهاك قانون حفظ الطاقة. ولكن مبدأ عدم التحديد يسمح بعدم الحفظ للطاقة بمقدار ΔE إذا حدث فقط خلال الفترة Δt، كما في العلاقة: $(\Delta E)(\Delta t) \approx h/2\pi$. نضع ΔE مساوية للطاقة اللازمة لخلق الكتلة m للميزون: $\Delta E = mc^2$. إنّ قانون حفظ الطاقة ينتهك خلال الفترة الزمنية التي يكون فيها الميزون موجودًا، والتي تمثل الزمن Δt الذي يحتاج إليه الميزون ليمر من نيوكلون إلى آخر، حيث يُمتَص ويختفي. إذا افترضنا أنّ الميزون ينتقل بسرعة نسبوية، قريبة من سرعة الضوء c، فإنّ Δt على الأغلب تكون حوالي $\Delta t = d/c$ حيث d أقصى مسافة يمكن أن تفصل بين النيوكلونات المتفاعلة.

وهكذا يمكن أن نكتب

$$\Delta E\, \Delta t \approx \frac{h}{2\pi}$$

$$mc^2\left(\frac{d}{c}\right) \approx \frac{h}{2\pi}$$

أو

كتلة الجُسيم المتبادل

$$mc^2 \approx \frac{hc}{2\pi d} \qquad \textbf{(3-32)}$$

إنّ مدى القوة النووية القوية (أقصى مسافة بعيدة تؤثر عندها) صغير، - ليس أكبر بكثير من حجم النيوكلون أو النواة الصغيرة (انظر المعادلة 30-1) - لذا، دعنا نأخذ $d \approx 1.5 \times 10^{-15}\,\text{m}$، بالتالي من (المعادلة 32-3)، نجد أنّ

$$mc^2 \approx \frac{hc}{2\pi d} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(6.28)(1.5 \times 10^{-15}\,\text{m})} \approx 2.1 \times 10^{-11}\,\text{J} = 130\,\text{MeV}$$

أي أنّ كتلة الميزون المتنبأ به $130\,\text{MeV}/c^2$ تقريبًا، وتساوي حوالي 250 ضعف كتلة الإلكترون $0.51\,\text{MeV}/c^2$.*

* لاحظ أنّ مدى القوة الكهرومغناطيسية غير محدود، وبوضع $d = \infty$ في (المعادلة 32-3)فإنها تخبرنا إنّ كتلة سكون جُسيم التبادل بالنسبة إلى القوة الكهرومغناطيسية- الفوتون- يجب أن تكون صفرًا، وهو ما يحققه الفوتون.

بيون

إنّ الجُسيم الذي تنبأ به يوكاوا اكتشف في الأشعة الكونية بواسطة العالمين باول واوسشيلاني في عام 1947. وقد أُطلق عليه اسم "π" أو باي ميزون، أو ببساطة بيون. يظهر هذا الجُسيم في ثلاث حالات للشحنةهي: +، أو −، أو 0. إنّ كتلة كلّ من الجُسيمين π^+ و π^- تساوي $139.6\ \mathrm{MeV}/c^2$، أما كتلة π^0 فتساوي$135.0\ \mathrm{MeV}/c^2$، وجميعها قريبة مما تنبأ به يوكاوا. وهذه الجُسيمات الثلاثة تتفاعل بقوة مع المادة. وقد اشتملت التفاعلات التي شوهدت في المختبر باستعمال مسارع الجُسيمات على ما يلي:

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$

(4-32)

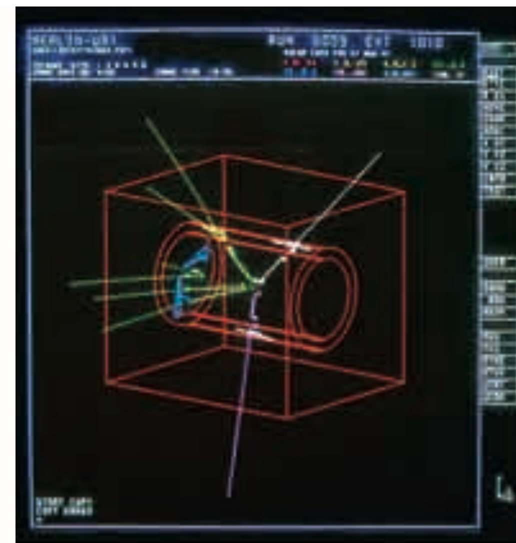
$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$$

تنقل القوى بواسطة جُسيمات حتى في النموذج المعياري.

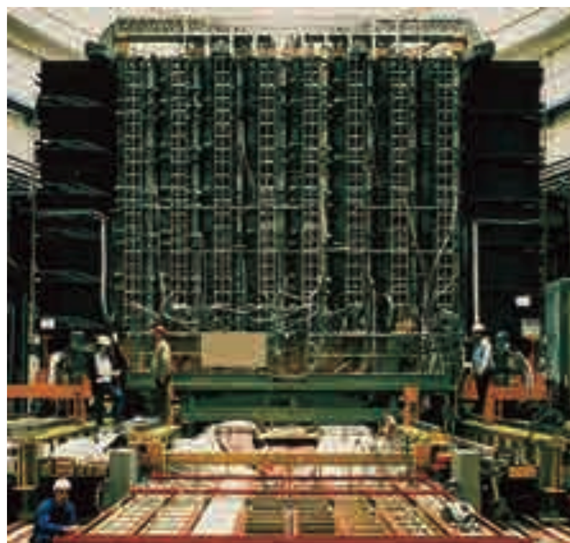
حيث يجب أن تكون طاقة البروتون الساقط من المسارع كافية لإنتاج الكتلة الإضافية للبيون الحر. لقد أصبحت نظرية يوكاوا في تبادل البيون كناقل للقوة النووية القوية قديمة الآن، وقد حلَّت مكانها ديناميكا اللون الكمية التي ترى أنّ الكيانات الأساسية الكواركات. والنواقل الأساسية للقوة النووية هي الغلونات كما سنرى قريبًا. ولكن تبقى الفكرة الأساسية للنظرية القديمة صحيحة؛ وهي أنّ القوى يمكن أن تفهم على أنها تبادل للجُسيمات.

هناك أربعة أنواع معروفة من القوى أو التفاعلات في الطبيعة هي: القوة الكهرومغناطيسية التي تنقل بواسطة الفوتون. والقوة النووية القوية التي تنقل بواسطة الغلونات. ولكن ماذا عن القوتين الأخريين: القوة النووية الضعيفة وقوة الجاذبية؟ يعتقد أيضًا بأنهما تنقلان بواسطة جُسيمين. ويرمز للجُسيمات التي تنقل القوة النووية الضعيفة بالرموز W^-، W^+ و Z^0 حيث تم اكتشافها في عام 1983 (الشكل 32-9).

الشكل 9-32 (أ) تمثل هذه الصورة التي عولجت حاسوبيًا اضمحلال جُسيم Z إلى إلكترون وبوزيترون $(Z^0 \rightarrow e^+ + e^-)$ التي تظهر مساراتهما باللون الأبيض حيث تم كشفها بواسطة الكاشف UA1 في سيرن (CERN). (ب) صورة الكاشف UA1 في سيرن (CERN) كما تم بناؤه.



(أ)



(ب)

غرافتون

أما الجُسيم الكمّي (أو الناقل) لقوة الجاذبية فيُسَمّى **غرافتونا**. وإذا كان موجودًا، فإنّه لم يشاهد بعد. يبين (الجدول 32-1) مقارنة بين هذه القوى الأربع، حيث تم ترتيبها حسب شدتها النسبية التقريبية. لاحظ أنّه بالرغم من أنّ قوة الجاذبية ربّما تكون القوة الأكثر وضوحًا في حياتنا اليومية (بسبب الكتلة الضخمة للأرض) إلا أنّها الأضعف بين القوى الأربع على المقياس النووي، ويمكن إهمال تأثيرها على مستوى الجُسيم دائمًا.

الجدول 32-1 القوى الأربع في الطبيعة.

النّوع	الشّدّة النّسبيّة (لبروتونين داخل النواة)	جسيم المجال
النووية القوية	1	غلونات* (ميزونات)
الكهرومغناطيسية	10^{-2}	فوتون
النووية الضعيفة	10^{-6}	$W^{\pm}$ و Z^0
الجاذبية	10^{-38}	غرافتون (؟)

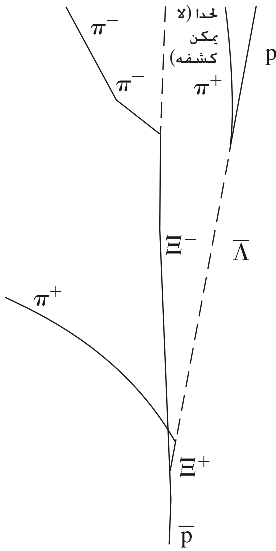
* حتى عام 1970 كان يعتقد بأنها ميزونات، ولكنها تعدّ الآن غلونات (انظر إلى البند 32-10).

3-32 الجُسيمات والجُسيمات المضادة

رأينا في (الفصلين 27 و 30) أنّ البوزيترون إلكترونٌ موجبُ الشحنة أساسًا. أي أنّ العديد من خصائصه هي تلك التي للإلكترونات نفسها، مثل الكتلة، ولكن شحنته متعاكسة. كما أنّ هناك أعدادًا كمية أخرى للجُسيمات تكون متعاكسة بالنسبة إلى الجُسيمات المضادة، وهو ما سندرسه لاحقًا. وعليه، يقال إنّ البوزيترون هو **الجُسيم المضاد للإلكترون**. بعد أن اكتشف البوزيترون في عام 1932، كان يُتنبأ بأنّ الجُسيمات الأخرى يجب أن يكون لها أيضًا **جُسيمات مضادة**. وفي عام 1955 تم اكتشاف الجُسيم المضاد للبروتون وهو ضديد البروتون ($\overline{\text{p}}$) الذي يحمل شحنة سالبة، انظر إلى (الشكل 32-10). (يشير الخط الذي فوق الحرف p إلى ضديد الجُسيم). وبعد ذلك بوقت قصير اكتشف ضديد النيوترون ($\overline{\text{n}}$) إنّ الجُسيمات جميعها لها جُسيمات مضادة، ولكن القليل منها مثل الفوتون و π^0 ليس له جُسيمات مضادة مميزة؛ وهنا نقول إنها جُسيمات مضادة لنفسها * .

الشكل 32-10 صورة غرفة فقاعية (يستعمل فيها الهيدروجين السائل) توضح عملية تصادم ضديد البروتون ($\overline{\text{p}}$) مع بروتون ساكن لينتج زوج Xi– ضديد ($\overline{\text{p}} + \text{p} \rightarrow \Xi^- + \Xi^+$) والتي تضمحل إلى جُسيمات أخرى. أما الرسم، فيشير إلى تحديد جُسيمات كلّ مسار على أساس كيفية اضمحلال الجُسيم والكتل التي تم تقديرها من كمية التحرك المقيسة (انحناء المسار في مجال مغناطيسي) والطاقة (على سبيل المثال سمك المسار). توضح الخطوط المتقطعة مسارات الجُسيم المتعادل؛ لأنّ الجُسيمات المتعادلة لا تنتج فقاعات. لذا، لا يوجد لها مسارات.



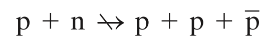


تنتج الجُسيمات المضادة في التفاعلات النووية عندما تتوافر طاقة كافية، ولكن مدة حياتها ليست طويلة جدًا بوجود المادة. فعلى سبيل المثال، فإنّ البوزيترون مستقر عندما يكون لوحده، ولكنه إذا واجه إلكترونًا، فإنّ كلا منهما يفني الآخر. تتحول الطاقة التي تنتج من اختفاء كتلتيهما إضافة إلى أيّ طاقة حركية يمتلكانها إلى طاقة لأشعة γ أو أيّ جُسيمات أخرى. يحدث الفناء أيضًا لأزواج "الجُسيم – ضديد الجُسيم" الأخرى جميعها.

4-32 تفاعلات الجُسيم وقوانين الحفظ

إنّ أحد أهم استعمالات مسارعات الطاقة العالية هو دراسة تفاعلات الجُسيمات الأولية مع بعضها. ولترتيب هذا العالم دون النووي، فإنّ قوانين الحفظ أساسية في هذا المجال. ولقد وجد أنّ قوانين حفظ الطاقة، وكمية التحرك، وكمية التحرك الزاوية، والشحنة الكهربائية، تتحقق بشكل دقيق في تفاعلات الجُسيم كلّها.

لقد دلت تفاعلات الجُسيم على وجود قوانين حفظ جديدة (تمامًا كالقديمة) والتي هي مبادئ ترتيب، تساعد على تفسير إمكانية حدوث بعض التفاعلات وعدم حدوث تفاعلات أخرى. فعلى سبيل المثال، التفاعل التالي لم يحدث مطلقا.



$$\text{p} + \text{n} \nrightarrow \text{p} + \text{p} + \overline{\text{p}}$$

على الرغم من أنّ الشحنة والطاقة وغيرهما محافظة (يعني الرمز $\overline{\text{p}}$ البروتون المضاد. أما الرمز $\nrightarrow$ فيعني أنّ التفاعل لن يحدث). ولفهم السبب في عدم حدوث هذا التفاعل؛ افترض الفيزيائيون قانون حفظ جديد، حفظ عدد الباريون.

* لاحظ على سبيل المثال أنّ الشحنة المعاكسة لـ $Q = 0$ ما تزال صفرًا.

(عدد الباريون هو تعميم لعدد النيوكلون الذي تبين لنا أنّه محافظ في التفاعلات النووية والاضمحلال النووي أيضًا). تملك النيوكلونات جميعها عدد باريون $B = +1$. في حين تمتلك النيوكلونات المضادة (ضديد كلّ من البروتون والنيوترون) **عدد باريون** $B = -1$. أما الأنواع الأخرى جميعها من الجُسيمات، كالفوتونات، والميزونات، والإلكترونات، بالإضافة إلى الليبتونات الأخرى فتمتلك عدد باريون $B = 0$. لذا، نجد أنّ التفاعل الذي في بداية هذه الفقرة لا يحفظ عدد الباريون لأنّ الجهة اليسرى للتفاعل تمتلك عدد باريون $B = (+1) + (+1) = +2$، في حين أنّ الجهة اليمنى تمتلك $B = (+1) + (+1) + (-1) = +1$. ومن جهة أخرى، نجد أنّ التفاعل التالي يحفظ عدد الباريون B، أي أنه يحدث إذا كانت طاقة الجُسيم الساقط كافية.

عدد الباريون

$$p + p \rightarrow p + p + \bar{p} + p$$
$$B = +1 + 1 = +1 + 1 - 1 + 1$$

وكما بينا أعلاه، نجد أنّ $B = +2$ على جانبي هذه المعادلة. ومن هذه التفاعلات وغيرها، فقد أثبت أنّ حفظ **عدد الباريون** مبدأ أساسيّ في الفيزياء.

حفظ عدد الباريون

كما أنّه من المفيد أيضًا دراسة قوانين الحفظ **لأعداد الليبتون** الثلاثة المرتبطة بالتفاعلات الضعيفة والاضمحلال النووي. وفي الاضمحلال العادي لجُسيم β، ينبعث إلكترون أو بوزيترون إلى جانب النيوترينو أو ضديد النيوترينو. وفي نوع مشابه لهذا الاضمحلال، يمكن أن ينبعث جُسيم يُسَمّى "μ"، أو ميزون ميو، أو **ميونا** بدلاً من الإلكترون. يبدو أنّ الميون (اكتشف عام 1937) يشبه الإلكترون إلى حدّ كبير باستثناء كتلته التي هي أكبر بحوالي 207 مرات ($106\ \mathrm{MeV}/c^2$) كتلة الإلكترون. أما النيوترينو (ν_e) الذي يصاحب الإلكترون المنبعث، فقد وجد أنه يختلف عن النيوترينو (ν_μ) الذي يصاحب الميون المنبعث. ولكلّ نيوترينو ν_μ منها جُسيم مضاد: $\bar{\nu}_e$ و $\bar{\nu}_\mu$. فعلى سبيل المثال في اضمحلال β الاعتيادي، نجد أنّ

أعداد الليبتون

تنويه: الأنواع المختلفة من النيوتريونات ليست متطابقة

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

وليس التفاعل $n \nrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$. ولتفسير عدم حدوث هذا التفاعل؛ فقد ظهرت فكرة **عدد الليبتون الإلكتروني** L_e. فإذا كان $L_e = +1$ للإلكترون (e^-) والنيوترينو إلكترون (ν_e)، وكان $L_e = +1$ لكلّ من e^+ و $\bar{\nu}_e$. في حين أنّ $L_e = -1$ للجُسيمات الأخرى جميعها، فإنّ كلّ اضمحلال تمت مشاهدته يحقق مبدأ حفظ L_e. على سبيل المثال، في التفاعل $L_e = 0$، $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ نجد أنّ $L_e = 0$ بداية، و $L_e = 0 + (+1) + (-1) = 0$ بعد الاضمحلال. كلّ اضمحلال لا يحفظ L_e، حتى لو حقّق قوانين الحفظ الأخرى، لا يحدث أبدًا.

حفظ أعداد الليبتون

في الاضمحلال الذي يشتمل على الميونات، مثل

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

هناك عدد كمّيّ آخر يجب أن يكون محفوظًا وهو **عدد الليبتون ميون** (L_μ)، $L_\mu = +1$ لكلّ من μ^- . و ν_μ و $L_\mu = -1$ لكلّ من μ^+ و $\bar{\nu}_\mu$. أما لبقية الجُسيمات الأخرى، فإنّ $L_\mu = 0$. L_μ يجب أن يكون محفوظًا في أيّ تفاعل أو اضمحلال. ويمكن بطريقة مشابهة أيضًا تعيين عدد الليبتون تاو L_τ الذي يرتبط مع الليبتون τ (اكتشف عام 1976 وكتلته أكبر من كتلة الإلكترون بحوالي 3000 مرة) ونيوترينو تاو، ν_τ.

تذكر أنّ الجُسيمات المضادة ليس لها فقط شحنة كهربائية معاكسة لتلك التي لجُسيماتها، ولكنها أيضًا معاكسة في أعداد B، L_τ، L_μ و L_e. على سبيل المثال، نجد أنّ $B = +1$ للنيوترينو، ولكن $B = -1$ بالنسبة إلى ضديد النيوترينو (أعداد الليبتون جميعها تساوي صفرًا).

تمتلك الجُسيمات المضادة Q, B, L معاكسة.

المثال المفاهيمي 32-4 **عدد الليبتون في اضمحلال الميون**

أيّ من مخططات الاضمحلال التالية متوقع حدوثه بالنسبة لاضمحلال الميون:
(أ) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$؛ (ب) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$؛ (ج) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e$؟ تمتلك الجُسيمات جميعها $L_\tau = 0$.

الإجابة: يمتلك μ^- في الحالة الابتدائية $L_\mu = +1$ و $L_e = 0$، ويجب أن يكون له أيضًا $L_\mu = +1$ و $L_e = 0$ في الحالة النهائية (بعد الاضمحلال). في (أ) في الحالة النهائية نجد أنّ $L_\mu = 0 + 0 = 0$ و $L_e = +1 - 1 = 0$؛ أي أنّ L_μ غير محفوظ. وبالفعل، فإنه لم يشاهد حدوث هذا الاضمحلال. تشتمل الحالة النهائية في (ب) على $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$، و $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$؛ أي أنّ كلاهما محفوظ. وفي الحقيقة، فإنّ هذا الاضمحلال هو النوع الأكثر شيوعًا بالنسبة إلى μ^- وأخيرًا، فإنّ التفاعل في (ج) لا يحدث لأنّ ($= +2$ في الحالة النهائية) غير محفوظ وكذلك الحال بالنسبة إلى L_μ.

مثال إضافي

المثال 32-5 **حفظ الطّاقة وكميّة التّحرّك**

بالإضافة إلى قوانين حفظ الأعداد التي تساعد في تفسير مخططات اضمحلال الجُسيمات، يمكننا أيضًا تطبيق قوانين حفظ الطاقة وكمية التحرك. ينتج من اضمحلال جُسيم Σ^+ الساكن وكتلة سكونه $1189\ \mathrm{MeV}/c^2$ (الجدول 32-2 في الصفحة التالية) بروتون (كتلة سكونه $938\ \mathrm{MeV}/c^2$) وبيون متعادل π^0 (كتلة سكونه $135\ \mathrm{MeV}/c^2$).

$$\Sigma^+ \rightarrow \mathrm{p} + \pi^0$$

جد الطاقة الحركية لكلّ ناتج من نواتج الاضمحلال، على فرض أنّ الجُسيم الأم Σ^+ كان ساكنًا.

النهج: نجد الطاقة المتحررة من تحوّل الكتلة $(E = mc^2)$ كما قمنا بذلك بالنسبة للعمليات النووية (المعادلة 30-2 أو 31-1)، ونطبق قانون حفظ الطاقة وكمية التحرك.

الحلّ: الطاقة المتحررة أو قيمة Q، عبارة عن الكتلة المتحولة مضروبة في c^2.

$$Q = [m_{\Sigma^+} - (m_\mathrm{p} + m_{\pi^0})]c^2 = [1189 - (938 + 135)]\ \mathrm{MeV} = 116\ \mathrm{MeV}$$

وتصبح هذه الطاقةُ طاقةً حركية للجُسيمات الناتجة من الاضمحلال، $\mathrm{p} + \pi^0$

$$Q = \mathrm{KE}_\mathrm{p} + \mathrm{KE}_{\pi^0}$$

وترتبط الطاقة الحركية لكلّ جُسيم مع كمية التحرك الخاصة به بالعلاقة (المعادلتان 26-7 و 26-10):

$$\mathrm{KE}_\mathrm{p} = E_\mathrm{p} - m_\mathrm{p}c^2 = \sqrt{(p_\mathrm{p}c)^2 + (m_\mathrm{p}c^2)^2} - m_\mathrm{p}c^2$$

وينطبق هذا أيضًا على البيون. ومن قانون حفظ كمية التحرك، نجد أنّ البروتون والميون لهما المقدار نفسه لكمية التحرك؛ لأنّ الجُسيم الأصلي كان ساكنًا. $p_\mathrm{p} = p_{\pi^0} = p$. وعليه، نجد أنّ

$$Q = 116\ \mathrm{MeV} = \left[\sqrt{(pc)^2 + (938\ \mathrm{MeV})^2} - 938\ \mathrm{MeV}\right] + \left[\sqrt{(pc)^2 + (135\ \mathrm{MeV})^2} - 135\ \mathrm{MeV}\right]$$

وبحلّ هذه العلاقة بالنسبة إلى pc نجد أنّ $pc = 189\ \mathrm{MeV}$. وبالتعويض في العلاقة التي للطاقة الحركية، بالنسبة إلى البروتون أولاً، ثم للبيون نحصل على $\mathrm{KE}_\mathrm{p} = 19\ \mathrm{MeV}$ و $\mathrm{KE}_{\pi^0} = 97\ \mathrm{MeV}$.

32-5 النيوترينات – نتائج حديثة

تُعدّ دراسة النيوترينو من المواضيع المهمة في الوقت الحاضر. تجرى التجارب في مختبرات تحت أرضية عميقة، وأحيانًا في فوهات مناجم عميقة. إنّ الهدف من الطبقة السميكة للأرض هو ترشيح الجُسيمات الأخرى كلّها والناجّة من الخلفية الإشعاعية، بحيث يصل إلى الكواشف بشكل رئيس نيوترينات التفاعل الضعيف.

هناك نتيجتان مهمتان تمّ التوصل إليهما في بداية القرن الحادي والعشرين؛ الأولى هي أنّ النيوترينات الثلاثة ν_e و ν_μ و ν_τ يمكن أن تتغير من حين إلى آخر من أحد الأنواع إلى نوع آخر في ظروف معينة، وتُسَمّى هذه الظاهرةُ اهتزازَ **الصفة المميزة للنيوترينو** (كلّ نوع من الأنواع الثلاثة سمّي بصفة مميزة مختلفة). وتقترح هذه النتيجة أنّ أعداد الليبتون L_e، L_μ، L_τ ليست محفوظة بشكل تام، ولكن يعتقد بأنّ مجموع هذه الأعداد $L_\mathrm{e} + L_\mu + L_\tau$ محفوظ دائمًا. أما النتيجة الاستثنائية الثانية التي كانت موضع تخمين منذ فترة طويلة فهي: هل النيوترينو عديم الكتلة كما كان يعتقد في الأصل؟ أم أنّ كتلة السكون له لا تساوي صفرًا؟ وقد أُجريت حسابات على الحدود العليا للكتل. ولكن في عام 2002 أظهرت تجارب فيزياء فلكية أنّ مجموع كتل الأنواع الثلاثة للنيوترينات يجب أن تكون أقلّ من حوالي $1\ \mathrm{eV}/c^2$. ولكن، هل يمكن أن تكون الكتل صفرًا؟ الجواب لا؛ إذا كانت هناك اهتزازات الصفة المميزة التي ناقشناها سابقًا. وعلى الأرجح، يبدو أنّ نوعًا واحدًا على الأقلّ من هذه الأنواع له كتلة سكون تساوي 0.05 eV على الأقل؛ وهذه نتيجة رائعة.

اهتزازات النيوترينو

6-32 تصنيف الجُسيمات

خلال العقود التي تلت اكتشاف π ميزون في أواخر أربعينيّات القرن الماضي، تم اكتشاف مئات أخرى من الجُسيمات دون النووية. ويمكن ترتيب هذه الجُسيمات في مجموعات حسب تفاعلاتها؛ لأنّ هذه الجُسيمات لا تتفاعل جميعها من خلال القوى الأربع المعروفة في الطبيعة (على الرغم من أنّها جميعها تتفاعل من خلال الجاذبية). يشتمل (الجدول 32-2) على أكثر هذه الجُسيمات شيوعًا مصنفة حسب طريقة التفاعل، إلى جانب العديد من خصائصها. إنّ الجُسيمات المدرجة في الجدول هي تلك المستقرة إضافة إلى جُسيمات أخرى غير مستقرة. ويشتمل الجزء العلوي من الجدول على **بوزونات القياس** (سميت بذلك نسبة إلى النظرية التي تصفها وهي نظرية القياس) التي تضم الغلونات، والفوتون، وجُسيمي W، و Z. وهذه هي الجُسيمات التي تقوم بدور الوسيط في التفاعلات القوية، الكهرومغناطيسية والضعيفة، على الترتيب.

مقياس البوزونات

اللبتونات

ثم يأتي في (الجدول 32-2) مجموعة **الليبتونات**، وهي جُسيمات لا تتفاعل من خلال القوة النووية القوية، ولكنها تتفاعل من خلال القوة النووية الضعيفة. كما أنّ الليبتونات التي تحمل شحنة كهربائية أيضًا تتفاعل من خلال القوة الكهرومغناطيسية. وتضم الليبتونات كلاً من الإلكترون، والميون، والتاو، والأنواع الثلاثة للنيوترينات: إلكترون نيوترينو (ν_e)، وميون نيوترينو (ν_μ)، وتاونيوترينو (ν_τ). وكلّ منها له جُسيم مضاد.

هادرونات

أمّا المجموعة الثالثة من الجُسيمات في (الجدول 32-2) فهي **الهادرونات**، وهي الجُسيمات التي تتفاعل من خلال القوة النووية القوية. لذلك، يقال إنّها **جُسيمات تتفاعل بقوة**. كما تتفاعل هذه الجُسيمات أيضًا من خلال القوى الأخرى، ولكن القوة النووية القوية هي الشائعة عند المسافات القصيرة. تضم الهادرونات كلاً من البروتون، والنيوترون، والبيون، ومجموعة كبيرة من الجُسيمات الأخرى. وتقسم هذه الهادرونات إلى مجموعتين جزئيتين هما: **الباريونات**، وهي الجُسيمات التي يكون عدد البرويون لها $+1$ (أو -1 بالنسبة إلى الجُسيمات المضادة)، **والميزونات**، وهي الجُسيمات التي يكون لها عدد البرويون $= 0$.

البرويونات

الميزونات

الجدول 32-2 جسيمات (مستقرة في ظل الاضمحلال القوي) *

التصنيف	القوى العاملة	اسم الجسيم	الرمز	ضديد الجسيم	المغزلية	الكتلةالسكونية $(\mathrm{MeV})^2c/$	B	L_e	L_μ	L_τ	S	فترة الحياة (s)	نمط الاضمحلال الرئيسي
						[أضداد الأجسام يكون لها اشارات سالبة]							
مقياس البوسونات ناقل القوة	g	Gluons	g	Self	1	0	0	0	0	0	0	Stable	
	em	Photon	γ	Self	1	0	0	0	0	0	0	Stable	
	w, em	W	W^+	W^-	1	80.41×10^3	0	0	0	0	0	3×10^{-25}	$e\nu_e$, $\mu\nu_\mu$, $\tau\nu_\tau$, hadrons
	w	Z	Z^0	Self	1	91.19×10^3	0	0	0	0	0	3×10^{-25}	e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, hadrons
الليبتونات	w, em **	Electron	e^-	e^+	$\frac{1}{2}$	0.511	0	+1	0	0	0	Stable	
		Neutrino (e)	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$\frac{1}{2}$	0 (<0.6 eV)‡	0	+1	0	0	0	Stable	
		Muon	μ^-	μ^+	$\frac{1}{2}$	105.7	0	0	+1	0	0	2.20×10^{-6}	$e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$
		Neutrino (μ)	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	$\frac{1}{2}$	0 (<0.6 eV)‡	0	0	+1	0	0	Stable	
		Tau	τ^-	τ^+	$\frac{1}{2}$	1777	0	0	0	+1	0	2.91×10^{-13}	$\mu^-\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$, $e^-\bar{\nu}_e\nu_\tau$, hadrons + ν_τ
		Neutrino (τ)	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	$\frac{1}{2}$	0 (<0.6 eV)‡	0	0	0	+1	0	Stable	
مسارع الدقائق النووية الميزونات	s, em, w	Pion	π^+	π^-	0	139.6	0	0	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^+\nu_\mu$
			π^0	Self	0	135.0	0	0	0	0	0	0.84×10^{-16}	2γ
		Kaon	K^+	K^-	0	493.7	0	0	0	0	+1	1.24×10^{-8}	$\mu^+\nu_\mu$, $\pi^+\pi^0$
			K^0_S	$\bar{K}^0_S$	0	497.7	0	0	0	0	+1	0.89×10^{-10}	$\pi^+\pi^-$, $2\pi^0$
			K^0_L	$\bar{K}^0_L$	0	497.7	0	0	0	0	+1	5.17×10^{-8}	$\pi^\pm e^\mp \overset{(-)}{\nu}_e$, $\pi^\pm\mu^\mp \overset{(-)}{\nu}_\mu$, 3π
		Eta and others	η^0	Self	0	547.3	0	0	0	0	0	5×10^{-19}	2γ, $3\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^0$
الباريونات	s, em, w	Proton	p	$\bar{p}$	$\frac{1}{2}$	938.3	+1	0	0	0	0	Stable	
		Neutron	n	$\bar{n}$	$\frac{1}{2}$	939.6	+1	0	0	0	0	887	$pe^-\bar{\nu}_e$
		Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	$\frac{1}{2}$	1115.7	+1	0	0	0	−1	2.63×10^{-10}	$p\pi^-$, $n\pi^0$
		Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	$\frac{1}{2}$	1189.4	+1	0	0	0	−1	0.80×10^{-10}	$p\pi^0$, $n\pi^+$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	$\frac{1}{2}$	1192.6	+1	0	0	0	−1	7.4×10^{-20}	$\Lambda^0\gamma$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	$\frac{1}{2}$	1197.4	+1	0	0	0	−1	1.48×10^{-10}	$n\pi^-$
		Xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	$\frac{1}{2}$	1314.9	+1	0	0	0	−2	2.90×10^{-10}	$\Lambda^0\pi^0$
			Ξ^-	Ξ^+	$\frac{1}{2}$	1321.3	+1	0	0	0	−2	1.64×10^{-10}	$\Lambda^0\pi^-$
		Omega and others	Ω^-	Ω^+	$\frac{3}{2}$	1672.5	+1	0	0	0	−3	0.82×10^{-10}	$\Xi^0\pi^-$, Λ^0K^-, $\Xi^-\pi^0$

* انظر الجدول 32-4 حول دقائق الشارم والبوتوميز.

** تدخل النيوترينوات في التفاعلات الضعيفة. اعطيت الحدود العليا لكتل النيترينوات في بعض الاقواس ()، كما تم الحصول عليها من بحث WMAP (الفصل 33). اظهر الكشف عن تحول النيوترينوات الى دقائق اخرى أن على الأقل نيوترينو واحد له كتلة اكبر من 0.05 eV

يشتمل (الجدول 32-2) على عدد قليل فقط من مئات الهادرونات التي تم اكتشافها. لاحظ أنّ الباريونات Λ، Σ، Ξ و Ω تضمحل جميعها إلى باريونات أقلّ كتلة. وفي النهاية إلى بروتون أو نيوترون. وفي هذه العمليات جميعها يكون عدد الباريون محفوظًا. وبما أنه لا يوجد جُسيم أخفّ من البروتون. فإنّ عدد الباريون له $B = +1$. وعليه، إذا كان عدد الباريون محافظا، فإنّ البروتون نفسه لا يمكن أن يضمحل، وبالتالي فإنه مستقر. (لكن انظر إلى البند 32-11).

إنّ أعداد الباريون والليبتون (B, L_e, L_μ, L_τ) بالإضافة إلى الغرابة S (البند 32-8) المعروضة في (الجدول 32-2) هي للجُسيمات، أما جُسيماتها المضادة فتكون إشارة هذه الأعداد معكوسة.

32-7 استقرار الجُسيم والرنين

تعتمد مدة الحياة على نوع القوة المؤثرة.

إنّ العديد من الجُسيمات المدرجة في (الجدول 32-2) غير مستقرة. تعتمد مدة حياة الجُسيم غير المستقر على القوة التي تكون أكثر فاعلية في التسبب بحدوث الاضمحلال. وكلّما كانت القوة المؤثرة في الاضمحلال أقوى زادت سرعة حدوثه. وتبلغ مدة حياة الاضمحلال الذي يحدث بسبب القوة النووية الضعيفة 10^{-13} s أو أطول (باستثناء W و Z). أما الاضمحلال بواسطة القوة الكهرومغناطيسية فمدة حياته أقلّ من ذلك، أي حوالي 10^{-16} - 10^{-19} s. ويشتمل عادة على أشعة جاما (فوتون). إنّ الجُسيمات غير المستقرة المدرجة في (الجدول 32-2) تضمحل بواسطة القوة النووية الضعيفة أو التفاعل الكهرومغناطيسي.

يستدل على الجُسيمات التي مدة حياتها قصيرة جدّا من خلال الجُسيمات التي تنتج من اضمحلالها.

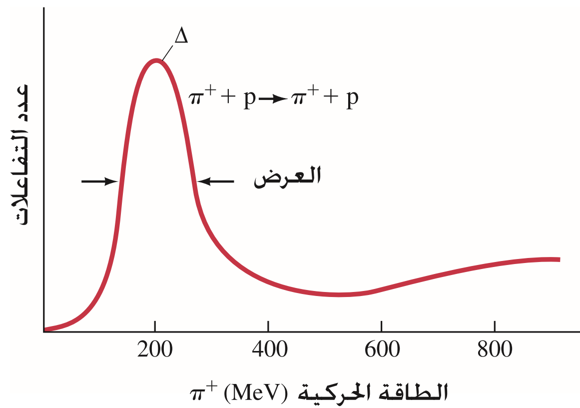
لقد وجد أنّ هناك العديد من الجُسيمات التي تضمحل من خلال التفاعل النووي القوي. إنّ مدة حياة هذه الجُسيمات قصيرة جدًا، حيث تبلغ حوالي 10^{-23} s وهي غير مدرجة في (الجدول 32-2). ويُستدل على مثل هذه الجُسيمات التي مدة حياتها قصيرة جدّا من خلال الجُسيمات التي تنتج من اضمحلالها. وسنتناول الآن أول هذه الجُسيمات الذي اكتشف (بواسطة فيرمي) باستعمال حزمة من π^+ توجه بكميات متغيرة من الطاقة خلال هدف من الهيدروجين (بروتونات). يوضح (الشكل 32-11) رسمًا بيانيًا لعدد التفاعلات(تبعثر π^+) مقابل الطاقة الحركية للبيون.

إنّ العدد الكبير من التفاعلات حول قيمة الطاقة 200 MeV جعل فيرمي يستنتج أنّ البروتون وجُسيم π^+ يتحدان مع بعضهما لحظيّا لتشكيل جُسيم مدّةُ حياته قصيرة قبل أن ينفصلا عن بعضهما مرة أخرى، أو على الأقل أنّ رنينهما يحدث بشكل متزامن لفترة قصيرة جدًا. وفي الحقيقة، فإنّ القمة الكبيرة التي في (الشكل 32-11) تشبه منحنى الرنين (انظر إلى الشكلين 11-18 و 21-42) وهذا "الجُسيم" الجديد – يُسَمّى الآن Δ- يعرف بِـ "**الرنين**". لقد وجد أنّ هناك مئات أخرى من الرنين، وقد عُدّ كلّ منها على أنه حالة إثارة لجُسيم أقلّ كتلة مثل النيوكلون.

الرنين

يربط مبدأ عدم اليقين مدى الحياة والكتلة

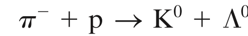
يعدُّ عرضُ الرنين – في (الشكل 32-11) عرض قمة Δ حواليـ100 MeV- تطبيقا مهما لمبدأ عدم التحديد. إذا دامت فترة حياة جُسيم مدة 10^{-23} s فقط، فإنّ مقدار عدم التحديد في كتلته (طاقة سكونه) يساوي $\Delta E \approx h/(2\pi\ \Delta t) \approx (6.6 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s})/(6)(10^{-23}\,\mathrm{s}) \approx\ 10^{-11}\,\mathrm{J} \approx 100\,\mathrm{MeV}$ وهذا ما تمت مشاهدته. وفي الحقيقة، فإنّ مدة الحياة $\approx 10^{-23}$ s استنتجت بواسطة العملية العكسية: من عرض القمة الذي تم قياسه ليكون ≈ 100 MeV



الشكل 32-11 عدد جُسيمات π^+ التي تبعثرت من هدف البروتون كدالة في الطاقة الحركية لجُسيمات π^+ الساقطة. يعطي شكل الرنين معلومات عن جُسيم مدة حياته قصيرة – وهو جُسيم Δ، وشحنته في هذه الحالة $+2e$ (Δ^{++}).

8-32 الجُسيمات الغريبة؟ السّاحرة؟ ربما تكون هناك حاجة إلى نموذج جديد!

لقد وُجِدَ في بداية خمسينيّات القرن الماضي أنّ الجُسيمات الجديدة التي اكتشفت مثل K، Λ و Σ تتصرف بطريقة غريبة من حيث إنها: 1- تُنتج دائمًا على شكل أزواج. فعلى سبيل المثال، نجد أنّ احتمالية حدوث التفاعل الآتي كبيرة:



$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$$

في حين أنّ التفاعل المشابه $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ لم يشاهد حدوثه مطلقًا، بالرغم من عدم انتهاكه لأيّ من قوانين الحفظ المعروفة. 2- تنتج من خلال التفاعل النووي القوي (بمعدل مرتفع)، ولكنها لا تضمحل بالمعدل الذي يميز التفاعل القوي (على الرّغم من أنها تضمحل إلى جُسيمات شديدة التفاعل).

الغرابة وحفظها

ولتوضيح هذه المشاهدات؛ فقد تمّ تعريف عدد كمّيّ جديد ألا وهو **الغرابة**، وقانون حفظ جديد يُسَمّى **حفظ الغرابة**. وبتحديد أعداد الغرابة (S) المشار إليها في (الجدول 32-2) يتم تفسير إنتاج الجُسيمات الغريبة على شكل أزواج. على سبيل المثال، في التفاعل $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ نجد أنّ الغرابة للجُسيمات الداخلة في التفاعل $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ تساوي $S = 0 + 0 = 0$، أما للجُسيمات الناتجة، فنجد أنّها $S = +1 - 1 = 0$، أي أنّ الغرابة محفوظة. وفي التفاعل فإنّ $S = 0$ للحالة الابتدائية، ولكن للحالة النهائية للتفاعل نجدها $S = +1 + 0 = +1$، أي أنّ الغرابة غير محفوظة، وبالتالي لم يشاهد حدوث هذا التفاعل مطلقًا.

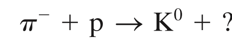
الغرابة محفوظة في التفاعلات القوية و ليس في التفاعلات الضعيفة.

ولتفسير عملية اضمحلال الجُسيمات الغريبة؛ فقد افتُرض أنّ الغرابة محفوظة في التفاعل القوي وليس في التفاعل الضعيف. لذلك، فإنّ مبدأ حفظ الغرابة يمنع اضمحلال الجُسيمات الغريبة من خلال التفاعل القوي إلى جُسيمات غير غريبة كتلتها أقل، ولكنها قد تضمحل من خلال التفاعل الضعيف الذي يميز بمدة حياة أطول من 10^{-8} s إلى 10^{-10}.

لقد كان مبدأ حفظ الغرابة المثالَ الأول على كمية *محافظة جزئيًا*. في هذه الحالة، تحفظ كمية الغرابة بواسطة التفاعلات القوية وليس الضعيفة.

المثال المفاهيمي 32-6 **خمّن الجُسيم المفقود**

استعمل قوانين الحفظ لتفاعلات الجُسيمات لتحديد الجُسيم المفقود في التفاعل الآتي:



$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + ?$$

بالإضافة إلى $K^0 + \Lambda^0$.

الإجابة: نكتب المعادلات الخاصة بالأعداد المحفوظة لهذا التفاعل، والتي تشتمل على المجاهيل B، L_e و S، و Q والتي إذا ما تم تحديدها فإنها تدلّ على الجُسيم المفقود.

عدد الباريون: $0 + 1 = 0 + B$

عدد الليبتون: $0 + 0 = 0 + L_e$

الشحنة: $-1 + 1 = 0 + Q$

الغرابة: $0 + 0 = 1 + S$

لذا، فإنّ الجُسيم المجهول الناتج من التفاعل يجب أن يكون له الخصائص التالية:

$B = +1 \quad L_e = 0 \quad Q = 0 \quad S = -1$

بالإضافة إلى Λ^0، فإنّ جُسيم سيجما المتعادل Σ^0 تنطبق عليه هذه الأعداد.

في البند القادم، سنناقش كمية أخرى محفوظة جزئيًا، وقد أعطيت اسم السّاحر. لقد ساعد اكتشاف الجُسيم **السّاحر** في عام 1974 على تقديم نظرية جديدة تشمل الكواركات التي سندرسها الآن.

9-32 الكواركات

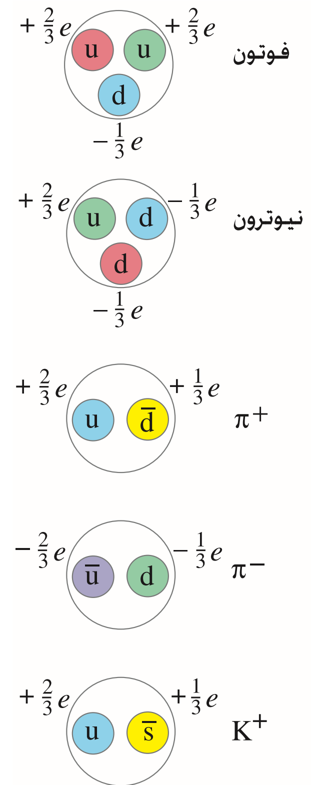
تُعدّ الجُسيمات جميعها - باستثناء بوزونات القياس- ليبتونات أو هادرونات. إنّ الفرق الرئيس بين هاتين المجموعتين هو أنّ الهادرونات تتفاعل من خلال التفاعل القوي، أما الليبتونات فلا يحدث لها هذا التفاعل.

إنّ الليبتونات الستة $(e^-$ ، μ^- ، τ ، ν_e ، ν_μ ، $\nu_\tau)$ جُسيمات أولية حقًّا؛ لأنها لا تظهر أيّ تركيب داخلي، كما أنّ حجمها لا يمكن قياسه (تشير محاولات تحديد حجم الليبتونات إلى حد أعلى يبلغ حوالي 10^{-18} m). ومن جهة أخرى، هناك المئات من الهادرونات التي تدل التجارب على وجود تركيب داخلي لها.

كواركات

في عام 1963، اقترح جلمان و زويغ أنّ أيًّا من الهادرونات، ولا حتى البروتون والنيوترون جُسيمًا أوليًا. ولكنه بدلا من ذلك مكون من ثلاثة كيانات نقطية أكثر أساسية تُسَمّى، على نحو غريب الأطوار، **كواركات***. إنّ نظرية الكواركات مقبولة بشكل جيد في الوقت الحاضر. وتعدّ الكواركات حقًّا جُسيمات أولية مثل الليبتونات. يرمز إلى الكواركات الثلاثة الأصلية التي تم اقتراحها بـ u، d، s اختصارًا لكلّ من: *علويّ* (*up*)، *وسفليّ* (*down*)، *وغريب* (*strange*). في الوقت الحاضر، تضم النظرية ستة كواركات، وهي كعدد الليبتونات تماما. تستند إلى تماثل مفترض في الطبيعة. تُسَمّى الكواركات الثلاثة الأخرى كما يلي: *ساحر* (*charmed*)، *وقاع* (*bottom*)، *وقمة* (*top*). تستعمل هذه الأسماء أيضًا لتدل على الخصائص الجديدة لكلّ منها (الأعداد الكمية c، t، b) التي تميز الكواركات الجديدة عن تلك القديمة (انظر الى الجدول 32-3) وهي محفوظة (مثل الغرابة) في التفاعلات القوية، ولكنها غير محفوظة في التفاعلات الضعيفة. مغزلية الكواركات جميعها $\frac{1}{2}$ وشحنتها الكهربائية $+\frac{2}{3}e$ أو $-\frac{1}{3}e$ (أي أنها جزء مما كان يعتقد بأنها الشحنة الأصغر e). أمّا بالنسبة إلى الكواركات المضادة، فإنّ إشارة الشحنة الكهربائية Q، وعدد الباريون B، والغرابة S، والسّاحر c، والقاع b، والقمة t، عكس تلك التي للكواركات. ويبين (الجدول 32-3) خصائص أخرى للكواركات.

الشكل 32-12 التركيب الكواركي لعدد من الجُسيمات



الجدول 32-3 خصائص الكواركات (تمتلك الكواركات المضادة إشارة عكس تلك لكلّ من: (Q, B, S, c, t, b)

الاسم	الرّمز	الشّحنة Q	عدد الباريون B	الغرابة S	السّاحر c	القاع b	القمة t
		الكواركات					
علويّ	u	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
سفليّ	d	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
غريب	s	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
ساحر	c	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	$+1$	0	0
قاع	b	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
قمة	t	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	$+1$

تتكون الهادرونات جميعها من مجموعات من الكواركات، وبالتالي يتم وصف خصائصها بالنظر إلى مكوناتها من الكواركات. تحتوي الميزونات على زوج من كوارك - كوارك المضاد. على سبيل المثال π^+ هو عبارة عن مجموعة $u\bar{d}$: لاحظ أنّ للزوج $u\bar{d}$ شحنة كهربائية $Q = \frac{2}{3}e + \frac{1}{3}e = +1e,\ B = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ و $S = 0 + 0 = 0$ تمامًا كما يجب أن تكون بالنسبة إلى π^+. كما أنّ $K^+ = u\bar{s}$ حيث إنّ $Q = +1$، و $B = 0$ و $S = +1$.

ميزون = كوارك + كوارك مضاد

من جهة أخرى، نجد أنّ الباريونات تتكون من ثلاثة كواركات. فعلى سبيل المثال، النيوترون $n = ddu$، أمّا البروتون المضاد $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$، انظر إلى (الشكل 32-12). تحتوي الجُسيمات الغريبة جميعها على كوارك c أو $\bar{c}$، في حين تحتوي الجُسيمات السّاحرة على كوارك s أو $\bar{s}$. ويحتوي (الجدول 32-4) على عدد قليل من هذه الهادرونات.

الباريون = 3 كواركات

بعد أن اقترحت نظرية الكوارك، بدأ الفيزيائيون بالبحث عن هذه الجُسيمات المشحونة جزئيًا، ولكن الكشف المباشر عنها لم يكن ناجحًا. تقترح النماذج الحديثة أنّ الكواركات ربما تكون متماسكة مع بعضها بعضا بحيث إنها قد لا توجد بصورة منفردة في حالة حرة. إلا أنّ مشاهدات إلكترونات الطاقة العالية المبعثرة من بروتونات تدلّ على أنّ البروتونات لها في الحقيقة مكونات.

* لقد اختار جلين -مان الكلمة من عبارة في قصة جلمس جويس فينجان ويكس (James Joyce's Finnegans Wake).

الجدول 32-4 قائمة جزئية من الهادرونات الثقيلة بالإضافة إلى الساحر والقاع ($L_e = L_\mu = L_\tau = 0$)

النوع	الجسيم	الجسيم المضاد	المغزليّة	كتلة السّكون (MeV/c^2)	عدد الباريون B	الغرابة S	التناحر c	قاع b	مدة الحياة	نوع الاضحلال الرئيس
Mesons	D^+	D^-	0	1869.4	0	0	+1	0	10.6×10^{-13}	$k+$ أخرى . $e+$ أخرى
	D^0	$\overline{D}^0$	0	1864.6	0	0	+1	0	4.2×10^{-13}	$k+$ أخرى . $e+,\mu$ أخرى
	D_S^+	D_S^-	0	1969	0	+1	+1	0	4.7×10^{-13}	$k+$ أخرى
	J/ψ (3097)	نفسه	1	3096.9	0	0	0	0	0.8×10^{-20}	هادرونات $\mu^-\mu^+, e^-e^+$
	Υ (9460)	نفسه	1	9460.4	0	0	0	0	1.3×10^{-20}	هادرونات $\tau^-\tau^+, e^-e^+, \mu^-\mu^+$
	B^-	B^+	0	5279	0	0	0	−1	1.5×10^{-12}	$D^0 +$ أخرى
	B^0	$\overline{B}^0$	0	5279	0	0	0	−1	1.5×10^{-12}	$D^0 +$ أخرى
باريونات	Λ_c^+	Λ_c^-	$\frac{1}{2}$	2285	+1	0	+1	0	2.0×10^{-13}	(هادرونات (أخرى + Λ)
	Σ_c^{++}	Σ_c^{--}	$\frac{1}{2}$	2453	+1	0	+1	0	?	$\Lambda_c^+ \pi^+$
	Σ_c^+	Σ_c^-	$\frac{1}{2}$	2454	+1	0	+1	0	?	$\Lambda_c^+ \pi^0$
	Σ_c^0	$\overline{\Sigma}_c^0$	$\frac{1}{2}$	2452	+1	0	+1	0	?	$\Lambda_c^+ \pi^-$
	Λ_b^0	$\overline{\Lambda}_b^0$	$\frac{1}{2}$	5640	+1	0	0	−1	1.1×10^{-12}	$J/\psi\Lambda^0, pD^0\pi^-, \Lambda_c^+\pi^+\pi^-\pi^-$

الجُسيمات البدائية هي كواركات وليتيونات وبوزونات القياس

في الوقت الحاضر، الجُسيمات التي تُعدّ أوليّة حقًّا هي الكواركات الستة والليبتونات الستة، بالإضافة إلى ميزونات القياس التي تنقل القوى الأساسية. انظر إلى (الجدول 32-5) حيث تم ترتيب الكواركات والليبتونات في ثلاثة "أجيال"؛ يضم الجيل الأول المادة العادية، أي الذرات التي تتكون من بروتونات ونيوترونات وإلكترونات. أما الجيلان الثاني والثالث، فيعتقد بأنّهما كانا موجودين في بداية تشكّل الكون، ولكن يمكننا رؤيتهما في الوقت الحاضر بواسطة مسارعات قوية أو في الأشعة الكونية. أما المئات الأخرى من الهادرونات، فيمكن أن تفسر بدلالة مجموعات من الكواركات الستة والكواركات المضادة لها.

الجدول 32-5 الجسيمات الأولية* كما ترى في الوقت الحاضر

بوزونات القياس	القوة		الجيل الأول	الجيل الثاني	الجيل الثالث
غلونات	قوية	كواركات	u, d	s, c	b, t
$W^\pm, Z_0$	ضعيفة	ليبتونات	e, ν_e	μ, ν_μ	τ, ν_τ
γ (فوتون)	كهرومغناطيسية				

* لاحظ أنّ الكواركات والليبتونات تم ترتيب كلّ منها في ثلاثة أجيال.

المثال المفاهيمي 32-7 **مجموعات الكوارك**

جد عدد كلّ من الباريون، والشحنة، والغرابة لمجموعات الكوارك التالية، وحدد جُسيم الهادرون الذي يتكون من مجموعات الكوارك هذه: (أ) udd، (ب) $u\bar{u}$، (جـ) uss، (د) sdd، (هـ) $b\bar{u}$.

الإجابة: نستعمل الجدول 32-3 للحصول على خصائص الكواركات، ثم (الجدول 32-2) أو (الجدول 32-4) لنجد الجُسيم الذي له هذه الخصائص.

(أ) بالنسبة إلى udd، نجد أنّ

$$Q = +\tfrac{2}{3}e - \tfrac{1}{3}e - \tfrac{1}{3}e = 0$$
$$B = \tfrac{1}{3} + \tfrac{1}{3} + \tfrac{1}{3} = 1$$
$$S = 0 + 0 + 0 = 0$$

بالإضافة إلى $c = 0$، و $b = 0$، و $t = 0$ الباريون الوحيد $(B = +1)$ الذي له $Q = 0$ و $S = 0$...إلخ هو النيوترون (الجدول 32-2)

(ب) بالنسبة إلى $u\bar{u}$، نجد أنّ $Q = \frac{2}{3}e - \frac{2}{3}e = 0$ و $B = 0$، بالإضافة إلى أنّ الأعداد الكمية الأخرى جميعها = صفرا. (يبدو أنّ هذا الجُسيم π^0، وهكذا نقول إنّ π^0 يساوي $u\bar{u} + d\bar{d}$).

(جـ) بالنسبة إلى uss، نجد أنّ $Q = 0,\ B = +1,\ S = -2$ والأعداد الكمية الأخرى = صفرا، وهذا الجُسيم هو Ξ^0

(د) بالنسبة إلى sdd، نجد أنّ $Q = -1,\ B = +1,\ S = -1$ وهذا الجُسيم يجب أن يكون Σ^-.

(هـ): بالنسبة إلى $b\bar{u}$، نجد أنّ $Q = -1,\ B = 0,\ S = 0,\ c = 0$، كما أنّ $b = -1$ و $t = 0$، وهذا الجُسيم يجب أن يكون B^- ميزون (انظر إلى الجدول 32-4).

التمرين ب: ما التركيب الكواركي للجُسيم K^- ميزون؟

10-32 "النّموذج العياريّ" ديناميكا اللون الكمية والنظرية الكهروضعيفة

بعد فترة قصيرة من اكتشاف نظرية الكوارك، اقترح العلماء أنّ الكواركات لها خاصية (أو نوعية) أخرى تُسَمّى **لونًا**، أو شحنة لونية (مماثلة للشحنة الكهربائية). والفرق بين الكواركات الستة (u, d, s, c, b, t) يعرف بـ "**النكهة**".

واستنادًا إلى هذه النظرية، فإنّ كلّ نكهة يمكن أن يكون لها ثلاثة ألوان، تصنف عادة إلى الأحمر، والأخضر، والأزرق. (هذه هي الألوان الأساسية الثلاثة التي عندما تُمزج مع بعضها بكميات متساوية- كما في شاشة التلفاز- تنتج اللون الأبيض). لاحظ أنّ مصطلحي "لون" و"نكهة" ليس لهما علاقة بحواسنا، وهي مجرد نزوات، ولكنها كالأسماء الأخرى، مثل ساحر، في هذا التخصص الجديد. على أيّ حال، فقد تمّ تلوين الكواركات كما في (الشكل 32-12). أما الكواركات المضادة فقد أعطيت ألوانًا مضادة هي: ضديد الأحمر، وضديد الأخضر، وضديد الأزرق. تتكون الباريونات من ثلاثة كواركات، لكلّ منها لون خاص. أمّا الميزونات، فتتكون من زوج كوارك - وكوارك مضاد؛ أي أنّها تتكون من لون محدد وضديد هذا اللون. وهكذا، فإنّ الباريونات والميزونات إمّا أن تكون عديمة اللون أو بيضاء.

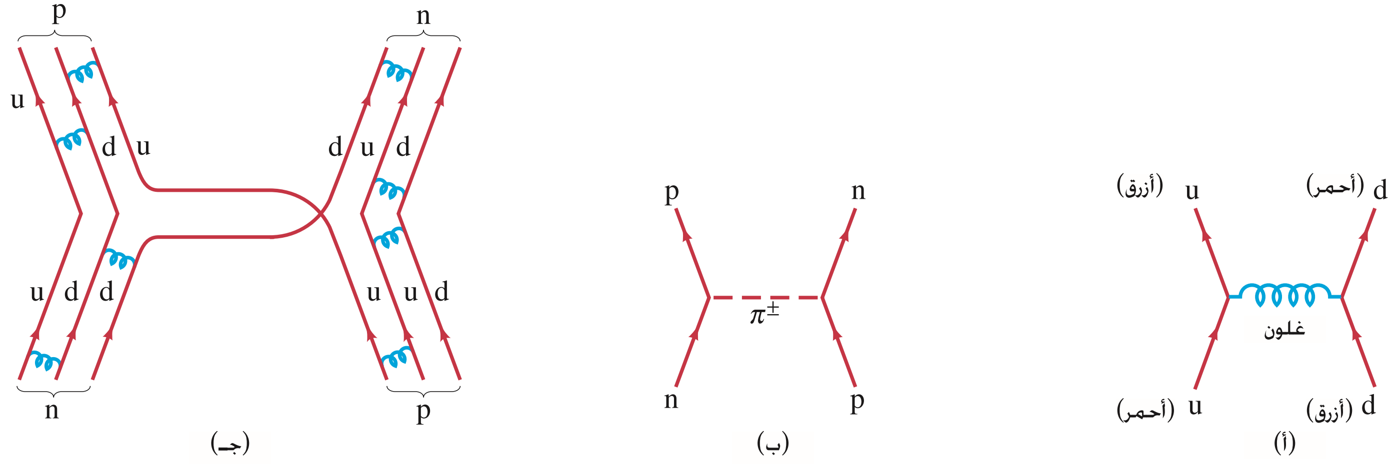
لقد اقترحت فكرة لون الكوارك في الأصل للإبقاء على مبدأ الاستبعاد لباولي (البند 28-7). لا تخضع الجُسيمات كلها لمبدأ الاستبعاد؛ فالجُسيمات التي تخضع لهذا المبدأ كالإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات تُسَمّى **فيرميونات**. أما الجُسيمات التي لا تخضع لهذا المبدأ فتُسَمّى **بوزونات**. وهذان النوعان من الجُسيمات يميزان أيضًا من حيث المغزلية (البند 28-6). فمغزلية البوزونات عدد صحيح (0, 1, 2,...) أمّا مغزلية الفيرميونات فهي نصف عدد صحيح ($\frac{3}{2}, \frac{5}{2}$,...). إنّ المادة تتشكل أساسًا من فيرميونات، إلا أنّ ناقلات القوى (γ, W, Z، غلونات) كلّها بوزونات. فيرميونات بوزونات

وبما أنّ الكواركات فيرميونات (مغزليتها) فيجب إذن أن تخضع لمبدأ الاستبعاد. ولكن هناك ثلاثة باريونات محددة (uuu, ddd,sss) يجب أن تكون الكواركات الثلاثة التي تتكون منها لها الأعداد الكمية نفسها . واثنان من الكواركات الثلاثة على الأقل يجب أن تكون مغزليتها بالاتجاه نفسه (لأنّ هناك اختيارين فقط؛ إما أن تكون المغزلية إلى الأعلى $\left[m_s = +\frac{1}{2}\right]$ أو إلى الأسفل $\left[m_s = -\frac{1}{2}\right]$). ويبدو من ذلك أنّ هناك خرقًا لمبدأ الاستبعاد. ولكن إذا كان للكواركات عدد كميّ إضافيّ (لون) بحيث يختلف من كوارك إلى آخر، فإنه يميزها عن بعضها، ويسمح بتحقيق مبدأ الاستبعاد على الرغم من أنّ لون الكوارك، والزيادة ثلاثية الأضعاف الناتجة في عدد الكواركات كانت في الأصل فكرة خاصة، إلا أنها جعلت النظرية أكثر اتفاقًا مع التجربة، مثل التنبؤ بالمدة الصحيحة لحياة الجُسيم π^0 ميزون. وفي الحال، أصبحت فكرة اللون الصفة المركزية في النظرية لتحديد القوة التي تجعل الكواركات متماسكة مع بعضها في الهادرون.

لقد افترض العلماء أنّ كلّ كوارك يحمل شحنة لونية+ مماثلة للشحنة الكهربائية، والقوة القوية بين الكواركات تُسَمّى القوة اللونية. وقد سميت هذه النظرية للقوة القوية بـ **ديناميكا اللون الكمية** (كرومات لون في اللغة اليونانية القديمة) أو اختصارًا **QCD** لتشير إلى القوة التي تؤثر بين الشحنات اللونية (وليس بين الشحنات الكهربائية). إنّ القوة القوية بين هادرونين هي القوة التي بين الكواركات المكونة لهما، كما هو مقترح في (الشكل 32-13). تُسَمّى الجُسيمات التي تنقل القوة اللونية (مماثل للفوتون في القوة الكهرومغناطيسية) **غالونات**، وهي مدرجة في (الجدول 32-5). هناك 8 غلونات، وجميعها حسب النظرية عديمة الكتلة وكلّ منها له شحنة لونية*. وهكذا، فإنّ الغلونات حلت مكان الميزونات (الجدول 32-1) كجُسيمات مسؤولة عن القوة القوية (اللونية). *QCD* غلونات

ربّما تسأل: ما الذي سيحدث إذا حاولنا رؤية كوارك وحيد ملون عن طريق الوصول إلى العمق داخل هادرون، واقتلاع كوارك وحيد. الكواركات متماسكة جدّا مع الكواركات الأخرى، بحيث إنّ اقتلاع واحد منها يتطلب مقدارًا هائلا من الطاقة إلى الحدّ الذي يكون كافيًا لخلق كواركات أكثر ($E = mc^2$). وبالفعل، فإنّ مثل هذه التجارب قد أجريت في المصادمات الحديثة للجُسيمات. وكلّ ما تمّ الحصول عليه هو هادرونات أكثر (أزواج من كوارك – كوارك مضاد، أو ثلاثية) وليس كواركا معزولا. تُسَمّى هذه الخاصية للكواركات- تتماسك مع بعضها في مجموعات عديمة اللون- بـ "حجز". حجز

* مقارنة مع التفاعل الكهرومغناطيسي، حيث لا يحمل الفوتون شحنة كهربائية، بما أنّ الفوتونات لها شحنة لونية، فإنها تستطيع أن تجذب بعضها بعضًا وتكون جسميات مركبة (لا تستطيع الفوتونات القيام بذلك). وما زال البحث جاريًا عن مثل هذه "الكرات الغروية"



الشكل 32-31 (أ) القوة بين كواركين تجعلهما متماسكين مع بعضهما كجزء من البروتون، على سبيل المثال. وتنقل بواسطة غلون يشتمل في هذه الحالة على شحنة لونية. (ب) تفاعل قوي $n + p \rightarrow n + p$. من خلال تبادل جُسيم π ميزون مشحون (+ أو -، اعتمادًا على فيما إذا تحرك إلى اليمين أو إلى اليسار) (جـ) التمثيل الكواركي للتفاعل نفسه $n + p \rightarrow n + p$. تمثل الخطوط الزرقاء التي على شكل ملف بين الكواركات تبادل الغلون الذي يجعل الهادرونات متماسكة مع بعضها.

وللقوّة اللونية خاصية مهمة، وهي أنه كلما اقترب كواركان من بعضهما كثيرًا (أو بشكل مكافئ إذا كان لهما طاقة عالية) فإنّ القوة بينهما تصبح أصغر. وتدعى هذه الميزة **حرية التقارب**.

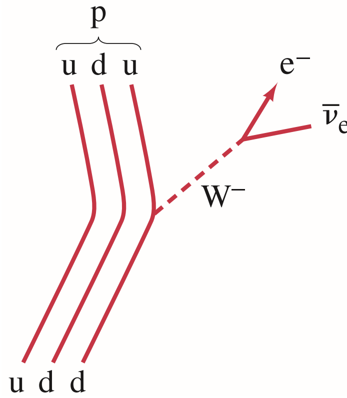
اللّيبتونات و القوة الضعيفة

رأينا فيما سبق أنّ القوة الضعيفة يعتقد بأنّها تُنقل بواسطة الجُسيمات W^+، W^- و Z^0. تؤثر هذه القوة بين الشحنات الضعيفة التي يمتلكها كلّ جُسيم. وهكذا، فإنّ كلّ جُسيم أوليّ يمكن أن يكون له: شحنة كهربائية، وشحنة ضعيفة، وشحنة لونية، وكتلة الجاذبية الأرضية. على الرغم من أنّ واحدة أو أكثر من هذه الصفات يمكن أن تكون صفرًا. على سبيل المثال، فإنّ الشحنة اللونية لليبتونات جميعها تساوي صفرًا، وبالتالي لا تتفاعل من خلال القوة القوية.

المثال المفاهيمي 32-8 **اضمحلال بيتا**

ارسم مخطط فاينمان، موضحًا ماذا يحدث في اضمحلال بيتا باستعمال الكواركات.

الإجابة: إنّ اضمحلال بيتا هو نتيجة للتفاعل الضعيف، حيث يكون الجُسيم الناقل $W^{\pm}$ أو Z^0. إنّ ما يحدث بشكل جزئيّ هو أنّ النيوترون (تركيبه الكواركي udd) يضمحل إلى بروتون (udd). ظاهريًّا، يتحول كوارك d (شحنته $-\frac{1}{3}e$) إلى كوارك u (شحنته $+\frac{2}{3}e$). وهذا يعني من مبدأ حفظ الشحنة أنّ جُسيمًا مشحونًا بشحنة سالبة، يُدعى W^-، قد صدر عن الكوارك d. وبما أنّ الحالة النهائية للتفاعل تشتمل على إلكترون ونيوترينو مضاد، فلا بدّ أنّ يكونا نتيجة للاضمحلال الافتراضي W^-، كما هو موضح في (الشكل 32-14).



الشكل 32-14 مخطط فاينمان يوضح التمثيل الكواركي لاضمحلال النيوترون β إلى بروتون بإصدار جُسيم بيتا.

وخلاصة هذا، فإنّ النموذج المعياري ينصّ على أنّ الجُسيمات الأولية حقًّا (جدول 32-5) هي اللّيبتونات، والكواركات، وبوزونات القياس (فوتون، W و Z، والغلونات). وهناك بعض النظريات التي تقترح وجود بوزونات أخرى. تجدر الإشارة إلى أنّ الفوتون، والليبتونات، و W^+، W^- و Z^0 قد تمت مشاهدتها في تجارب مختلفة. ولكن حتى الآن، تمت مشاهدة مجموعات الكواركات (الباريونات والميزونات). ويبدو من المرجح أنّ الكواركات الحرة والغلونات لا يمكن مشاهدتها.

توحيد

تكمن الميزة المهمة لأيّ دراسة نظرية جديدة في محاولة إيجاد قاعدة **موحدة** للقوى المختلفة في الطبيعة. وكان هذا هو أمل آينشتاين لأمد طويل، ولكنه لم يتمكن من تحقيقه. إنّ ما يُسَمّى **بنظرية القياس** التي توحد التفاعلات الضعيفة والكهرومغناطيسية قد قدّمت في ستينيّات القرن الماضي من قبل العلماء: وينبرغ، وغلاشو، وعبد السلام. في هذه **النظرية الكهروضعيفة**، ينظر للقوتين الضعيفة والكهرومغناطيسية على أنهما مظهران مختلفان لتفاعل وحيد أكثر أساسية يُسَمّى الكهروضعيف. لقد كان للنظرية الكهروضعيفة عدة نجاحات بما فيها التنبؤ بوجود الجُسيمات $W^{\pm}$ كناقل للقوة الضعيفة، بكتل تساوي $81 \pm 2\ \text{GeV}/c^2$، والتي تتفق تمامًا مع القيم التي تم قياسها وتساوي $80.41 \pm 0.10\ \text{GeV}/c^2$ (وبدقة مماثلة بالنسبة إلى الجُسيم Z^0).

النظرية الكهروضعيفة

النموذج العياري

في الوقت الحاضر، غالبًا ما تُسَمّى المجموعة التي تشتمل على النظرية الكهروضعيفة زائد QCD بالنسبة إلى التفاعل القوي باسم **النموذج العياري**.

هيغز

لقد تساءل علماء الفيزياء النظريّة عن سبب امتلاك جُسيمات W و Z كتلًا كبيرةً بدلًا من أن تكون عديمة الكتلة كالفوتون. قدمت النظرية الكهروضعيفة تفسيرًا مقترحًا لذلك بواسطة **مجال هيغز الجديد** وجُسيمه "**بوزون هيغز**" الذي يتفاعل مع W و Z لإبطائها. ولأنها مجبرة على الحركة بسرعة أقلّ من سرعة الضوء، فيجب عليها أن تكتسب كتلة. وسيكون البحث عن بوزون هيغز من أولويات علماء فيزياء الجُسيمات الأولية عندما يبدأ العمل في مسارع تصادم الهادرون الكبير (البند 32-12) في سيرن. حتى الآن استثنت الأبحاث وجود جُسيم هيغز أخفّ من $115\ \text{GeV}/c^2$. وعلى الرّغم من ذلك، فمن المتوقع ألا تكون كتلته أكبر من $200\ \text{GeV}/c^2$؛ فنحن نضيقها.

11-32 النظريات الموحدة الكبرى

GUT

توحيد القوى

مع نجاح النظرية الكهروضعيفة الموحدة جرت محاولات لدمجها مع QCD بالنسبة للقوة (اللونية) القوية فيما يُسَمّى **بالنَّظرية الموحدة الكبرى** (GUT). لقد تحقق في نوع مثل النظرية الموحدة الكبرى توحيد القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية. وينتمي فيها نوع واحد من الجُسيمات أي الليبتونات والكواركات إلى العائلة نفسها. ويمكنها أن تتغير بحرية من نوع إلى آخر. والقوى الثلاث عبارة عن صفات مختلفة لقوة أساسية وحيدة. وعلى أيّ حال، يتنبأ بحدوث التوحيد فقط على مقياس أقلّ من حوالي 10^{-32} m الذي يقابل طاقة عالية جدّا تصل إلى 10^{16} GeV تقريبا. فإذا اقترب جُسيمان أوليان (ليبتونات أو كواركات) من بعضهما على **مقياس التوحيد** هذا، فإنّ الصفة الأساسية الظاهرية التي تفرقهما عن بعضهما تختفي على هذا المستوى، ويمكن أن يتحول الكوارك بسهولة إلى ليبتون، أو العكس. وعليه، لن تكون أعداد الباريون والليبتون محفوظة. كما أنّ القوى الضعيفة، والكهرومغناطيسية، والقوية تمزج في قوة وحيدة شدتها وحيدة أيضًا.

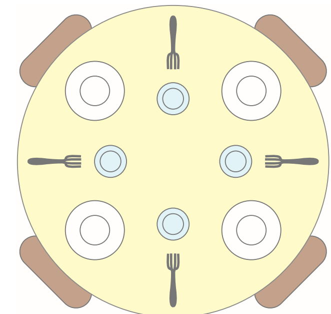
فرق التماثل

أمّا ما يحدث بين المسافة الموحدة البالغة 10^{-32} m والمسافات العادية (الكبيرة) فيُسَمّى **خرقًا للتماثل**. لتوضيح ذلك؛ افترض ذرة في بلّورة ما. داخل عمق الذرة هناك تماثل كبير؛ تكون الغيمةُ الإلكترونية في المناطق الأعمق متماثلةً كرويّا (فصل 28). كلما ابتعدنا نحو الخارج، ينهار هذا التماثل؛ تتوزع الغيوم الإلكترونية بشكل مميز على طول الخطوط (الروابط) التي تربط الذرات في البلورة. وبطريقة مشابهة، فإنّه عند الحدّ 10^{-32} m تكون القوةُ بين الجُسيمات الأولية نظريّا قوةً وحيدة؛ إنها متماثلة، ولا ينفرد نوع من الشحنة على آخر. ولكن عند المسافات الكبيرة، ينهار هذا التماثل، ونرى ثلاث قوى مميزة. (في النموذج المعياري للتفاعلات الكهروضعيفة، (البند 32-10)، يحدث انهيار للتماثل بين التفاعلات الكهرومغناطيسية والضعيفة عند حوالي 10^{-18} m).

المثال المفاهيمي 32-9 التّماثل

هناك أربعة أماكن متماثلة يمكن الجلوس عليها إلى الطاولة المبينة في (الشكل 32 - 15). جلوس أربعة أشخاص لتناول الطعام صف تماثل هذه الطاولة، وما يحدث له عندما يبدأ أحد الأشخاص بتناول الطعام.

الإجابة: هذه الطاولة لها أنواع عديدة من التماثل. فهي متماثلة بالنسبة للدوران بزاوية $90°$؛ أي أنّ الطاولة تظهر كما هي إذا حرك كلّ شخص كرسيّا واحدًا إلى اليسار أو إلى اليمين. كما أنها متماثلة أيضًا شمالا – جنوبًا وشرقًا – غربًا، بحيث إنّ تبادل الطعام عبر الطاولة لن يؤثر في الهيئة التي تظهر فيها. ولا يؤثر أيضًا فيما إذا أخذ أيّ شخص الشوكة التي إلى يمين الصحن أو الشوكة التي إلى يساره. ولكن حالما يأخذ الشخص الأول أيًّا من الشوكتين، فإنه يحدّد أيضًا الاختيار بالنسبة لبقية الأشخاص الذين يجلسون إلى الطاولة. وينهار التماثل. إنّ التماثل الأساسيّ ما زال قائمًا؛ حيث يمكن اختيار الزجاجات الزرقاء بأيّ من الطريقتين. ولكن يجب أن يحصل اختيارٌ ما، وعند هذه اللحظة ينهار التماثل في تناول الطعام.



الشكل 32-15 التماثل حول طاولة. (المثال 32-9).

اضمحلال البروتون

بما أنّ التوحيد يحدث عند مثل هذه المسافات الدقيقة والطاقات الهائلة، فمن الصعب اختبار النظرية تجريبيًّا. ولكنّه ليس مستحيلًا تمامًا. أحد التنبؤات القابلة للاختبار هي فكرة اضمحلال البروتون (على سبيل المثال، من خلال $p \rightarrow \pi^0 + e^+$)، وخرق مبدأ حفظ عدد الباريون. ويمكن حدوث ذلك إذا اقترب كواركان من بعضهما بعضًا ضمن مسافة 10^{-31} m. ولكنّه غير مرجح تمامًا عند درجة الحرارة والطاقة الطبيعيتين. لذا، فإنّ اضمحلال البروتون يمكن أن يكون عملية غير مرجحة الحدوث فقط. في الشكل البسيط لنظرية GUT قدّر علماء الفيزياء النظرية أنّ مدة حياة البروتون في نوع الاضمحلال $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ يساوي حوالي 10^{31} سنة، وقد جاء هذا فقط ضمن نطاق قابلية الاختبار.* ما زال اضمحلال البروتون غير مشاهد. على الرغم من أنّ التجارب وضعت حدًّا أدنى لمدة حياة البروتون في نمط الاضمحلال المشار إليه أعلاه ليكون 10^{33} سنة، أكبر إلى حدّ ما مما تنبأ به العلماء. قد يبدو هذا محبطًا، ولكنه من جهة أخرى، يقدم نوعًا من التحدي. وبالفعل، فإنّ النظريات الموحدة الكبرى الأكثر تعقيدًا لم تتأثر بهذه النتيجة.

المثال 32-10 اضمحلال بروتون.

يستعمل في تجربة 3300 طن من الماء بهدف الانتظار لرؤية اضمحلال البروتون من النوع $p \rightarrow \pi^0 + e^+$. إذا دام تشغيل التجربة أربع سنوات دون الكشف عن الاضمحلال، فقدّر الحدّ الأدنى لعمر النصف للبروتون.

النهج: كما وضحنا في موضوع الاضمحلال الإشعاعي، فإنّ عدد الاضمحلال يتناسب مع عدد الجُسيمات الأم (N)، والفترة الزمنية، (Δt) وثابت الاضمحلال (λ) الذي يرتبط مع عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ من خلال العلاقة (انظر إلى المعادلتين 30-3 و 30-6):

$$\Delta N = -\lambda N \,\Delta t = -\frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} N \,\Delta t$$

الحلّ: بما أننا نتعامل مع مقادير فقط، فإننا سنحلّ المعادلة بالنسبة إلى $T_{\frac{1}{2}}$:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{N}{\Delta N} \Delta t \ln 2$$

لأنّ $\Delta N < 1$ خلال المحاولة التي تدوم أربع سنوات، فإنّ

$$T_{\frac{1}{2}} > N(4\,\text{yr})(0.693)$$

حيث N عدد البروتونات الموجودة في كمية الماء البالغة 3300 طن. ولتحديد N؛ يجب ملاحظة أنّ جزيء الماء H_2O يحتوي على 10(= 8 + 2) بروتونات. لذا، فإنّ مولا واحدا من الماء $10 \times 6 \times 10^{23}$ يحتوي على 6×10^{23} بروتون في 18 g من الماء، أو حوالي 3×10^{26} بروتون لكلّ كيلوجرام. كلّ طن يساوي 10^3 kg. لذا، فإنّ الغرفة تحتوي على $(3.3 \times 10^6\,\text{kg})(3 \times 10^{26}\,\text{protons/kg}) \approx 1 \times 10^{33}$ protons وأنّ تقديرنا التقريبي للحدّ الأدنى لعمر النصف للبروتون هو $T_{\frac{1}{2}} > (10^{33})(4\,\text{yr})(0.7) \approx 3 \times 10^{33}$ yr.

الربط مع علم الكونيات

وهناك تنبؤ مثير للنظريات الموحدة يرتبط بعلم الكونيات (الفصل 33)، حيث يعتقد أنّه خلال أول 10^{-35} s بعد الانفجار العظيم الذي أدى إلى خلق الكون، كانت درجة الحرارة عالية جدًّا، بحيث إنّ طاقة الجُسيمات تناظر تلك التي لمقياس التوحيد. عدد الباريون لم يكن محفوظًا، وربما سمح ذلك بعدم التوازن الذي نشاهده في الكون والمتمثل في سيطرة المادة ($B > 0$) على ضديد المادة ($B < 0$).

هذا المثال الأخير مهمٌّ؛ لأنّه يوضح الترابط العميق بين الدراسات عند أيّ من طرفي مقياس الحجم. إنّ النظريات حول الأجسام الدقيقة (الجُسيمات الأولية) لها تأثير قوي في فهم الكون على نطاق واسع. وسوف ندرس هذا بالتفصيل في الفصل القادم.

* هذا أكبر بكثير من عمر الكون ($\approx 14 \times 10^9$ yr). ولكن ليس من الضروري أن ننتظر 10^{31} سنة لمشاهدته. وبدلاً من ذلك، يمكن أن ننتظر اضمحلال واحد من 10^{31} بروتون خلال سنة.
(انظر إلى المعادلتين 30-3 و 30-6، $\Delta N = \lambda N \,\Delta t = 0.693 N \,\Delta t / T_{\frac{1}{2}}$)

12-32 الأوتار والتماثل الفائق

نظرية الأوتار

إنّ الطموح أكثر من النظريات الموحدة الكبرى. لذا، فإنّ هناك محاولات لدمج الجاذبية، وبذلك تتوحد القوى الأربع في الطبيعة في نظرية واحدة (مثل هذه النظريات، تُسَمّى أحيانًا بطريقة مضللة **نظريات كلّ شيء**). وهناك نظريات متوافقة مع بعضها تحاول توحيد القوى الأربع جميعها تُسَمّى **نظريات الأوتار**، وفيها لا تُصَوَّرُ الجُسيمات الأولية (الجدول 32 – 5) على أنّها نقط، بل أوتار ذات بعد واحد ربّما يصل طولها إلى 10^{-35} m.

التماثل الفائق

هناك فكرة أخرى أيضًا ذات صلة، وهي **التماثل الفائق** التي تطبق على الأوتار لتتشكل بذلك **نظرية الأوتار الفائقة**. تتنبأ فكرة التماثل الفائق بوجود التفاعلات التي تغير الفيرميونات إلى بوزونات وبالعكس، وأنّ الفيرميونات المعروفة جميعها لها بوزونات شريكة التماثل الفائق. لذلك، فإنّ لكلّ كوارك (فيرميون) معروف كواركا فائقَ التماثل (بوزون). كما أنّ لكلّ ليبتون ليبتونا فائقَ التماثل. وعلى المنوال نفسه، سيكون لكلّ بوزون معروف (على سبيل المثال، الفوتونات والغلونات) فيرميون فائقُ التماثل (فوتينات وغلوينات).

تتنبأ فكرة التماثل الفائق أيضًا بأنّ الجُسيم الذي ينقل قوة الجاذبية "غرافيتون له شريك يُسَمّى غرافيتينو. ربما تكون جُسيمات التماثل الفائق مرشحة للمادة المظلمة في الكون (سيناقش في الفصل 33). ولكن لماذا لم يكتشف هذا الجزء المفقود من الكون مطلقًا ؟ إنّ أفضل تخمين هو أنّ جُسيمات التماثل الفائق ربما تكون أثقل من نظيراتها التقليدية. وربما تكون ثقيلة جدّا إلى الحدّ الذي لا يسمح بإنتاجها في المسارعات الموجودة حاليًّا. وحتى يتمّ اكتشاف جُسيم فائق التماثل، قد يكون ذلك ممكنًا في مسارع تصادم الهادرون الكبير في سيرن. ومع ذلك، تبقى هذه الفكرة- التماثل الفائق - مجرد تخمين رائع.

وهكذا، فإنّ عالم الجُسيمات الأولية يفتح آفاقا جديدة، ومن المؤكد أنّ ما سيحدث في المستقبل سيكون مثيرًا.

ملخص

تُستخدم مسارعات الجُسيمات في تعجيل الجُسيمات المشحونة، مثل الإلكترونات والبروتونات إلى طاقة عالية جدّا. إنّ الطول الموجيّ لجُسيمات الطاقة العالية قصير، وبالتالي يمكن استخدامها في سبر تركيب المادة عند مسافات صغيرة جدّا بدقة. تسمح الطاقة الحركية العالية لهذه الجُسيمات أيضًا بإنتاج جُسيمات جديدة خلال التصادم (بواسطة $E = mc^2$)

• يُستخدم في **السيكلوترن** و**السنكروترون** مجال مغناطيسي يجعل الجُسيمات تتحرك في مسار دائري بحيث يتم تعجيلها على فترات بواسطة جهد مرتفع. تعمل **المسارعات الخطّيّة** على تعجيل الجُسيمات على طول خط مستقيم. تسمح الحزم المتصادمة بإنتاج طاقة تفاعل عالية.

• الجُسيم المضاد له كتلة الجُسيم نفسها، ولكن شحنته معاكسة. ربما تكون بعض الخصائص الأخرى أيضًا معاكسة؛ فعلى سبيل المثال، **عدد الباريون** (عدد النيوكلون) للبروتون المضاد معاكس لذلك الذي للبروتون.

• في التفاعلات النووية والجُسيمية جميعها، يجب أن تتحقق قوانين الحفظ التالية: كمية التحرك الخطية، وكمية التحرك الزاوية، والكتلة – الطاقة، والشحنة الكهربائية، وعدد الباريون، **وأعداد الليبتون**.

• بعض الجُسيمات لها خاصية تُسَمّى الغرابة، وهي محفوظة بواسطة القوة القوية وليس القوة الضعيفة. كما أنّ الخصائص التالية: **ساحر**، **وقاع**، **وقمة محفوظة** بواسطة القوة القوية وليس بواسطة القوة الضعيفة.

• تمامًا كما يقال بأنّ القوة الكهرومغناطيسية تنتج من تبادل الفوتونات، فإنّ القوة النووية القوية كان يعتقد في البداية أنها تنقل بواسطة ميزونات لها كتلة سكون. ولكن النظرية الحديثة تقول إنّ القوة تنقل بواسطة **غلونات** عديمة الكتلة. تنقل جُسيمات W و Z القوة الضعيفة. تُسَمّى ناقلات القوى الأساسية بوزونات القياس، وتشمل كلا من الفوتون، والغلونات، و W، و Z.

• يمكن أن تُصَنَّفَ الجُسيمات الأخرى إلى ليبتونات أو هادرونات. تشارك الليبتونات في التفاعلات الضعيفة والكهرومغناطيسية المشحونة كهربائيًا. ينظر للهادرونات حاليًّا على أنّها مكوّنة من كواركات، تشارك أيضًا في التفاعلات القوية. يمكن أن تصنف الهادرونات إلى ميزونات، عدد الباريون لها صفر، وإلى باريونات عدد الباريون لها غير الصفر.

• تضمحل الجُسيمات جميعها باستثناء الفوتون، والإلكترون، والنيوترونات والبروتون بأعمار نصف يمكن قياسها، حيث تتراوح بين 10^{-25} s و 10^{3} s. يعتمد عمر النصف على القوة التي تسود عملية الاضمحلال. يتميز الاضمحلال الضعيف بأعمار نصف أكبر من حوالى 10^{-13}s. أما الاضمحلال الكهرومغناطيسي، فيتميز بأعمار نصف من رتبة 10^{-16} s إلى 10^{-19} s. تُسَمّى الجُسيماتُ الأقلّ حياة رنينًا، تضمحل من خلال التفاعل القوي وتعيش مدة 10^{-23} s فقط.

• في الوقت الحاضر، يرى النموذج المعياري للجُسيمات الأولية أنّ **الكواركات** هي لبنات البناء الأساسية للهادرونات. تُسَمّى الكواركات الستة "نكهات" وهي: **علويّ**، **وسفليّ**، **وغريب**، **وساحر**، **وقاع**، **وقمة**. لقد توقع العلماء أنّ عدد الكواركات هو عدد الليبتونات نفسه (ستة لكلّ منهما)، وأنّ الكواركات والليبتونات هي الجُسيمات الأولية الفعلية إضافة إلى بوزونات القياس (γ, W, Z، غلونات). يقال إنّ للكواركات لونًا، وحسب نظرية ديناميكا اللون الكمية (QCD) فإنّ قوة اللون القوية تؤثر بين شحناتها اللونية، وتنقل بواسطة غلونات. ترى النظرية الكهروضعيفة أنّ الفوتين الكهرومغناطيسية والضعيفة ميزتان لتفاعل أساسي وحيد. تُسَمّى نظرية QCD زائد النظرية الكهروضعيفة **بالنموذج المعياري**.

تقترح **النظريات الموحدة الكبرى** للقوى بأنه عند المسافات القصيرة جدّا (10^{-32} m) والطاقة العالية جدّا تبدو القوى الضعيفة، والكهرومغناطيسية، والقوية جميعها قوةً وحيدة، وأنّ الاختلاف الأساس بين الكواركات والليبتونات يختفي.

أسئلـــة

1. اعط تفاعلًا بين نيوكلونين، مشابه لما في (المعادلة 32 – 4)، والذي يمكنه إنتاج π^-.
2. إذا تحرك بروتون بسرعة عالية جدًا بحيث إنّ طاقته الحركية أكبر بكثير من طاقة سكونه (m_0c^2)، هل يمكنه بالتالي الاضمحلال عن طريق $p \to n + \pi^+$؟
3. ما الذي ستحتويه ذرة مضادة مكونة من الجُسيمات المضادة للمكونات الطبيعية للذرات؟ ما الذي قد يحدث إذا تمّ اتصال بين مادة مضادة، مكونة من مثل هذه الذرات المضادة مع عالمنا الطبيعي للمادة؟
4. ما الجُسيم الذي يشير في اضمحلال ما إلى التفاعل الكهرومغناطيسي؟
5. هل وجود النيوترينو بين نواتج اضمحلال جُسيم ما يعني بالضرورة أنّ هذا الاضمحلال يحدث من خلال التفاعل الضعيف؟ هل كلّ اضمحلال يحدث من خلال التفاعل الضعيف ينتج منه نيوترينو؟ فسّر ذلك.
6. لماذا يضمحل النيوترون من خلال التفاعل الضعيف بالرّغم من أنّ النيوترون وأحد نواتج اضمحلاله (البروتون) يتفاعلان بشكل قوي؟
7. أيّ من التفاعلات الأربعة (القوي، والكهرومغناطيسي، والضعيف، والجاذبية) يشارك فيه الإلكترون؟ البروتون؟ النيوترينو؟
8. تحقّق من حفظ الشحنة، وكذلك من عدد الباريون في كلّ اضمحلال موجود في (الجدول 32 - 2).
9. أيّ اضمحلال في (الجدول 32-2) يحدث من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي؟
10. أيّ اضمحلال في (الجدول 32–2) يحدث من خلال التفاعل الضعيف؟
11. بواسطة أيّ تفاعل يضمحل كلّ من $\Sigma^\pm$ و Σ^0 إلى Λ^0 . ولماذا ؟
12. يمتلك الباريون Δ مغزلية $\frac{3}{2}$، عدد باريون 1 وشحنة كهربائية $Q = +2,+1,0$ أو -1 . لماذا لا تكون هناك شحنة $Q = -2$؟
13. أيّ من الجُسيمات الواردة في (الجدول 32-4) يضمحل من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي؟
14. أيّ من الجُسيمات الواردة في (الجدول 32-4) يضمحل من خلال التفاعل الضعيف.
15. تمتلك الكواركات مغزلية تساوي $\frac{1}{2}$. كيف تفسر حقيقة أنّ مغزلية الباريونات $\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$ ومغزلية الميزونات 0 أو 1؟
16. افرض أنّ هناك نوعًا من النيوترينو عديم الكتلة، وليس له شحنة لونية ولا كهربائية، ولا يتأثر بالقوة الضعيفة. هل يمكنك القول بأنّ هذا الجُسيم موجود؟
17. هل يمكن لجُسيم ما أن يكون: (أ) ليبتونا وباريونا؟ (ب) باريونا وهادرونا؟ (جـ) ميزونا وكواركا؟ (د) هادرونا وليبتونا؟ فسّر إجابتك.
18. استخدم أفكار نظرية ديناميكا اللون الكمية، هل سيكون ممكنًا إيجاد جُسيمات مكونة من كواركين دون كواركات مضادة؟ ماذا عن كواركين وكواركين مضادين؟
19. لماذا تضمحل النيوترونات عندما تكون حرّة، ولا تضمحل وهي داخل النواة؟
20. هل يمكن حدوث التفاعل $e^- + p \to n + \bar{\nu}_e$؟ فسّر إجابتك.
21. أحيانًا، يضمحل الجُسيم Λ حسب التفاعل الآتي: $\Lambda^0 \to p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. أيٌّ من القوى الأربع في الطبيعة مسؤولة عن هذا الاضمحلال؟ كيف عرفت ذلك؟

مسائـل

32 – 1 الجُسيمات والمسارعات

1. (I) ما الطاقة الكلية لبروتون طاقته الحركية تساوي 6.35 GeV؟
2. (I) احسب الطّول الموجيّ لإلكترونات طاقتها 35-GeV.
3. (I) ما شدة المجال المغناطيسي في السيلكوترون الذي تعمل فيه البروتونات 2.8×10^7 دورة في الثانية؟
4. (I) ما الزمن الذي يحتاج إليه بروتون طاقته عالية جدًا لإتمام دورة واحدة في مسارع مختبر فيرمي الذي يبلغ نصف قطره 1.0 km؟
5. (I) إذا تم تعجيل جُسيمات α في السيكلوترون الوارد في (مثال 32-2)، كم يجب أن يكون تردد الجهد المؤثر بين طرفي الفجوة؟
6. (II) (أ) إذا عجّل السيكلوترون الوارد في (مثال 32-2) جُسيمات α، فما الطاقة القصوى التي تكتسبها؟ كم ستكون سرعة هذه الجُسيمات؟
(ب) أعد الحلّ بالنسبة للديوترونات $({}^2_1H)$. (جـ) كم التردد المطلوب للجهد في كلّ حالة ؟
7. أيهما أفضل لمعرفة تفاصيل النواة: بروتونات بقوة 30 MeV أول دقائق ألف بقوة 30 MeV؟ قارن بين طولي موجتيهما مع حجم مركز نواة النواة
8. (II) إذا كان الجهد المؤثر بين طرفي فجوة سيكلوترون 55 kV، فكم عدد الدورات التي تعملها البروتونات لتصل طاقتها الحركية إلى 25 MeV؟
9. (II) ما الطول الموجي (أقصى مسافة قابلة للتحليل) لبروتونات طاقتها 7.0 TeV؟
10. (II) يستخدم سيكلوترون نصف قطره 1.0 m لتعجيل ديوترونات $({}^2_1H)$ إلى طاقة 12 MeV. (أ) ما المجال المغناطيسي اللازم؟ (ب) ما تردد الجهد الذي يؤثر بين طرفي الفجوة؟ (جـ) إذا كان الفرق في الجهد بين طرفي الفجوة يساوي في المعدل 22 kV، كم عدد الدورات التي تعملها الجُسيمات قبل الخروج؟ كم الزمن الذي يحتاج إليه ديوترون واحد حتى يصل من نقطة البداية إلى المخرج؟ (جـ) قدّر المسافة التي يقطعها خلال هذا الزمن.
11. (II) يبلغ نصف قطر النفق الذي سيستخدم لتوضع فيه مغانط مسارع تصادم الهادرون الكبير (LHC) حوالي 4.25-km والذي سيعجل حزم البروتون إلى طاقة 7.0 TeV. ما المجال المغناطيسي الذي يُحتاج إليه؟
12. (II) يحتاج مسارع تيفاترون في مختبر فيرمي البالغ نصف قطره 1.0-km إلى حوالي 20 s حتى يعجل البروتونات المخزنة من 150 GeV إلى 1.0 TeV. يتم التعجيل مرة في كلّ دورة. قدّر الطاقة الممنوحة للبروتونات في كلّ دورة. (يمكن الافتراض بأنّ سرعة البروتونات تصل إلى سرعة الضوء c خلال الزمن اللازم لهذا التعجيل).
13. (III) أثبت أنّ طاقة جُسيم ما (شحنة e) في السنكروترون في الحدّ النسبي $(v \approx c)$ يعطى بالعلاقة $E\,(\text{in eV}) = Brc$، حيث B شدة المجال المغناطيسي، و r نصف قطر المدار الدائري (وحدات SI).
14. (III) ما شدة المجال المغناطيسي اللازمة لتعجيل البروتونات إلى 1.0-TeV في سنكروترون مختبر فيرمي البالغ نصف قطره 1.0-km؟

32-2 - 32-6 تفاعلات الجُسيم، تبادل الجُسيم

15. (I) كم كمية الطاقة التي تنطلق في الاضمحلال $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$؟ انظر إلى (الجدول 32-2).

16. (I) تقريبًا، كم كمية الطاقة التي تنطلق عند اضمحلال Λ^0 إلى $n + \pi^0$ (انظر إلى الجدول 32-2.)

17. (I) كم كمية الطاقة اللازمة لإنتاج زوج نيوترون – نيوترون مضاد؟

18. (I) قدّر مدى القوة القوية إذا كان الجُسيم الوسيط هو الكيون بدلا من البيون.

19. (II) يقترب بروتونان نحو بعضهما بسرعات متساوية. ما أقلّ طاقة حركية يجب أن يمتلك كلّ منهما حتى يتم خلق جُسيم ميزون π^0 في العملية (انظر إلى الجدول 32-2).

20. (II) ما أقلّ طاقة حركية يجب أن يمتلك كلّ نيوترون من نيوترينن إذا سارا بالسرعة نفسها نحو بعضهما بعضا، وتصادما وانتجا زوج K^+K^- بالإضافة إلى نفسيهما؟ (انظر إلى الجدول 32-2).

21. (II) قدّر مدى القوة الضعيفة مستخدمًا (المعادلة 32-3). مع العلم أنّ كتل الجُسيمين W، و Z هي من 80 إلى $90\ \text{GeV}/c^2$ تقريبًا.

22. (II) ما الأطوال الموجية للفوتونين الناتجين من فناء بروتون وبروتون مضاد من السكون؟

23. (II) لا يمكن للجُسيم Λ الاضمحلال بواسطة التفاعلات التالية. ما قانون الحفظ الذي لا يتحقق في كلّ تفاعل من منها:

(أ) $\Lambda^0 \to n + \pi^-$

(ب) $\Lambda^0 \to p + K^-$

(جـ) $\Lambda^0 \to \pi^+ + \pi^-$

24. (II) للاضمحلال $\Lambda^0 \to p + \pi^-$، احسب: (أ) قيمة Q (الطاقة التي تنطلق من التفاعل). (ب) الطاقة الحركية لكلّ من p و π^-، مفترضًا أنّ Λ^0 يضمحل من السكون. (استخدم الصيغ النسبية).

25. (II) (أ) أثبت من خلال حفظ كمية التحرك والطاقة، أنه من غير الممكن أن يشعّ إلكترون معزول فوتونا وحيدا فقط. (ب) بأخذ هذه النتيجة بالحسبان، كيف يمكنك الدفاع عن مخطط تبادل الفوتون الذي في (الشكل 32-7)؟

26. (II) ما الأطوال الموجية للبروتونين اللذين ينتجان عند فناء إلكترون وبوزيترون يسيران نحو بعضهما بطاقة تبلغ 420 keV ويتصادمان رأسا برأس؟

27. (II) في الاضمحلال النادر $\pi^+ + e^+ \to \nu_e$، ما الطاقة الحركية للبوزيترون؟ افرض أنّ π^+ تضمحل من السكون.

28. (II) أيّ اضمحلال وتفاعل مما يلي ممكن الحدوث؟ أما بالنسبة إلى الاضمحلال أو التفاعل الذي لا يمكن حدوثه، فوضّح أيّ القوانين التي لم تتحقق.

(أ) $\pi^- + p \to n + \eta^0$

(ب) $\pi^+ + p \to n + \pi^0$

(جـ) $\pi^+ + p \to p + e^+$

(د) $p \to e^+ + \nu_e$

(هـ) $\mu^+ \to e^+ + \bar{\nu}_\mu$

(و) $p \to n + e^+ + \nu_e$

29. (II) احسب الطاقة الحركية لكلّ ناتج من ناتجي الاضمحلال $\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-$. افرض أنّ الجُسيم Ξ^- يضمحل من السكون.

30. (III) هل يمكن للجُسيم π^+ ميزون أن يُنتج إذا تصادم بروتون طاقته 100-MeV مع بروتون ساكن؟ ما أقل طاقة حركية يجب أن يمتلكها البروتون الساقط؟

31. (III) احسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترون في الاضمحلال $\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. [مساعدة: في أيّ اتجاه يجب أن يتحرك النيوترونان بالنسبة إلى الإلكترون لكي يُعطي هذا الأخير الطاقة الحركية القصوى؟(الطاقة وكمية التحرك كلاهما محافظ. استخدم الصيغ النسبية)

32-7 - 32-11 الرّنين، النّموذج المعياريّ، الكواركات، QCD، GUT.

32. (I) استخدم (الشّكل 32-11) لتقدير عرض الطاقة، ثم مدة حياة الرنين Δ مستخدمًا مبدأ عدم التحديد.

33. (I) إذا عُلم أنّ عرض الطاقة الذي تم قياسه لميزون J/ψ يساوي 88 keV، فقدّر مدة حياته.

34. (I) إذا عُلم أنّ عرض الطاقة الذي تم قياسه لميزون ψ (3685) هو 277 keV، فقدّر مدة حياته.

35. (I) ما عرض الطاقة (أو عدم التحديد) لكلّ من (أ) η^0. (ب) Σ^0؟ انظر إلى (الجدول 32-2).

36. (I) يتشكل ميزون B^- من كواركين هما $b\bar{u}$.

(أ) أثبت أنّ ذلك يتوافق مع الأعداد الكمية كلّها.

(ب) ما مجموعات الكوارك لكلّ من B^+، B^0، و $\bar{B}^0$؟

37. (II) أيّ اضمحلال مما يلي ممكن الحدوث؟ أما بالنسبة إلى الاضمحلال الذي لا يمكن حدوثه، فوضّح أيّ القوانين التي لم تتحقق.

(أ) $\Xi^0 \to \Sigma^+ + \pi^-$

(ب) $\Omega^- \to \Sigma^0 + \pi^- + \nu$

(جـ) $\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma + \gamma$

38. (II) ما مجموعات الكوارك التي يمكن أن تشكّل (أ) النيوترون؟ (ب) النيوترون المضاد؟ (جـ) Λ^0؟ (د) $\bar{\Sigma}^0$؟

39. (II) ما الجُسيمات التي تنتجها مجموعات الكوارك التالية: (أ) uud؟ (ب) $\bar{u}\bar{u}\bar{s}$؟ (جـ) $\bar{u}s$؟ (د) $d\bar{u}$؟ (هـ) $c\bar{s}$؟

40. (II) ما مجموعة الكوارك اللازمة لإنتاج ميزون D^0 ($Q = B = S = 0, c = +1$)؟

41. (II) يمتلك ميزون D_S^+ $S = c = +1,\ B = 0$. ما مجموعة الكوارك التي ستنتجه؟

42. (II) باستعمال الكواركات، ارسم مخطط فاينان المحتمل للتفاعل $\pi^- + p \to \pi^0 + n$ (كما في الشكل 32-13 جـ).

43. ارسم مخطط فاينان للتفاعل $n + \nu_\mu \to p + \mu^-$

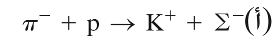
44. ما الطاقة الكلية لبروتون طاقته الحركية 25 GeV؟ ما طوله الموجيّ؟

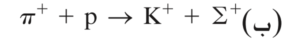
45. افرض أنّ هناك 5.0×10^{13} بروتون مخزنة عند طاقة 1.0 TeV في حلقة مسارع تيفاترون التي نصف قطرها 1.0 km. (أ) كم التيار (بالأمبير) الذي تحمله هذه الحزمة؟ (ب) كم السرعة التي يجب أن تتحرك بها سيارة كتلتها 1500 kg حتى تكون طاقتها الحركية مساوية لتلك التي لهذه الحزمة؟

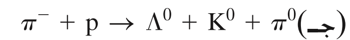
46. تحقن البروتونات في مسارع تيفاترون الذي نصف قطره 1.0 km عند طاقة 150 GeV. إذا تمّ تعجيلها بواسطة فرق جهد مقداره 2.5 MV في كلّ دورة، فكم المسافة التي سوف تقطعها؟ وكم الزمن الذي تحتاج إليه تقريبًا حتى تصل طاقتها 1.0 TeV؟

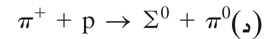
47. (أ) كم الطاقة التي تنبعث عندما يُفني إلكترون وبوزيترون بعضهما بعضا؟ (ب) كم الطاقة التي تنبعث عندما يُفني بروتون وبرتون مضاد بعضهما بعضا؟ (الطاقة الحركية للجُسيمات جميعها صفر).

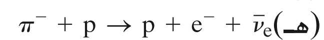
48. أيّ من التفاعلات التالية ممكنة الحدوث؟ وبواسطة أيّ تفاعل يتمّ ذلك؟ أمّا التفاعلات التي لا يسمح بحدوثها، ففسّر سبب عدم حدوثها.


(أ) $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$


(ب) $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$

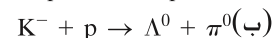

(جـ) $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0 + \pi^0$

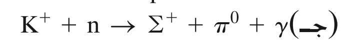

(د) $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^0 + \pi^0$

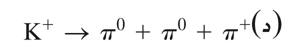

(هـ) $\pi^- + p \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

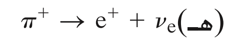
49. أيّ التفاعلات التالية ممكنة الحدوث، وبواسطة أيّ تفاعل يتمّ ذلك؟ أما التفاعلات التي لا يسمح بحدوثها، ففسّر لم لا تحدث.


(أ) $\pi^- + p \rightarrow K^0 + p + \pi^0$


(ب) $K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$


(جـ) $K^+ + n \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0 + \gamma$


(د) $K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^+$


(هـ) $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$

50. أحد أنماط الاضمحلال للجُسيم π^+ هو $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. ماذا سيكون الاضمحلال المكافئ للجُسيم π^-؟ تحقق من قواعد الحفظ.

51. يحدث انهيار التماثل في النظرية الكهروضعيفة عند حوالي 10^{-18} m. أثبت أنّ ذلك يقابل الطاقة التي لها رتبة كتلة $W^\pm$.

52. يمكن قياس كتلة الجُسيم π^0 من ملاحظة التفاعل $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ عند طاقة حركية منخفضة جدّا للجُسيم الساقط π^- (افرضها صفرا). لوحظ أنّ النيوترون ينبعث بطاقة حركية مقدارها 0.60 MeV. استخدم حفظ الطاقة وكمية التحرك لتحديد كتلة الجُسيم π^0.

53. احسب قيمة Q لكلّ تفاعل من تفاعلات (معادلة 32-4) إنتاج البيون.

54. احسب قيمة Q للتفاعل $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$. عندما يصطدم بيون سالب مع بروتون ساكن. قدّر أقلّ طاقة حركية يحتاج إليها البيون لينتج هذا التفاعل. [مساعدة: افرض أنّ Λ^0 و K^0 ينطلقان بالسرعة نفسها].

55. كم عدد الفيرمونات الأساسية الموجودة في جزيء الماء.

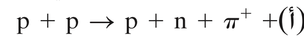
56. يُفني بروتون وبروتون مضاد بعضهما بعضًا من السكون. وينتج منهما البيونان π^- و π^+. ما الطاقة الحركية لكلّ بيون؟

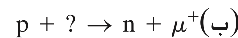
57. (أ) أثبت أنّ ما يُسَمّى المسافة الموحدة والبالغة 10^{16} GeV في النظرية الموحدة الكبرى تعادل طاقة تبلغ حوالي 10^{-32} m. استخدم مبدأ عدم التحديد وصيغة دي برولي للطول الموجيّ، ووضح كيف يتم تطبيقهما. (ب) احسب درجة الحرارة التي تقابل الطاقة 10^{16} GeV.

58. للتفاعل $p + p \rightarrow 3p + \bar{p}$، حيث يكون أحد البروتونين الداخلين في التفاعل ساكن. استخدم صيغة النظرية النسبية لإثبات أنّ طاقة حدّ العتبة تساوي $6m_p c^2$، أي أنها تساوي ثلاثة أضعاف قيمة Q لهذا التفاعل. حيث تمثل m_p كتلة البروتون. [مساعدة: افرض أنّ الجُسيمات الناتجة من التفاعل جميعها لها السرعة نفسها].

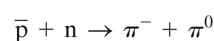
59. إنّ أعمار الجُسيمات المدرجة في (الجدول 32-2) هي بدلالة الزمن المناسب، وهي مقيسة في إطار مرجعي حيث يكون الجُسيم ساكنًا. إذا تم خلق جُسيم تاوليبتون بحيث إنّ طاقته الحركية 450 MeV، كم سيكون معدّل طول مساره عندما يتم قياسه في المختبر؟ أهمل أي تصادمات أخرى.

60. حدّد الجُسيم المفقود في التفاعلين الآتيين:


(أ) $p + p \rightarrow p + n + \pi^+ + $


(ب) $p + ? \rightarrow n + \mu^+$

61. استخدم نموذج الكوارك لوصف التفاعل الآتي:

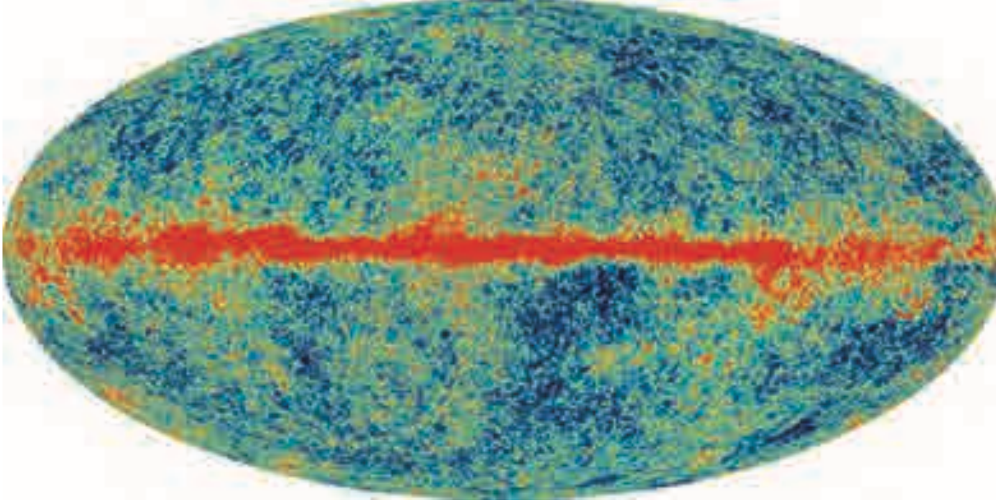

$\bar{p} + n \rightarrow \pi^- + \pi^0$

62. ما الكسر من سرعة الضوء c الذي تمثله سرعة بروتون طاقته 7.0 TeV؟

إجابات التمارين

أ: 1.24×10^{-18} m

ب: sū



تمثّل الألوان في هذه الخريطة للسماء (WMAP) التغيراتِ الطفيفةَ لدرجة الحرارة في الخلفية الإشعاعيّة المنتظمة الناجّة من أشعة الميكروويف التي حرارتها 2.7- K، والتي تصلنا من الاتجاهات جميعها في السماء. لقد أنتجت هذه الخريطة في عام 2003، وهي توفر لنا معلومات مفصلة عن أصل الكون وتركيبه. ويشير الشّريط الأحمر في المنتصف إلى مجرتنا؛ درب التبانة كما تبدو في صدر الصورة. (اختيرت لتكون خط الاستواء لهذا المسقط من السماء).ولمناقشة طبيعة الكون كما هو مفهوم هذه الأيام؛ نختبر النّظريات الأخيرة لكيفية تكوّن النّجوم والمجرات وتطورها، بما في ذلك التّركيب النّوويّ. وسنناقش باختصار نظرية آينشتاين للنسبية العامة، والتي تعنى بالجاذبيّة وتحدّب الفضاء. كما سنلقي نظرة عميقة على دلائل تمدد الكون والنموذج القياسيّ للكون المتطور عن نظرية الانفجار العظيم (*Big Bang*) . وسنشير أخيرا إلى بعض المشكلات التي لا تزال بحاجة إلى حلّ، كطبيعة الأجسام المعتمة، والطاقة المعتمة التي تشكّل معظم كوننا.

الفصل 33

الفيزياء الفلكيّة وعلم الكونيّات

درسنا في الفصل السّابق أدق الأجسام في الكون وهي الجسيمات الأولية، وسننتقل الآن إلى أضخمها وهي النّجوم والمجرات. هذان الموضوعان النقيضان؛ الجسيمات الأولية والأجسام الكونية يُعدّان من ضمن أكثر الموضوعات العلمية إثارة، وبطريقة مدهشة، فإنّ هذين الموضوعين النقيضين يرتبطان معًا بطريقة أساسية كما أشرنا في (الفصل 32).

إنّ استخدام التقنيات والأفكار الفيزيائيّة لدراسة السّماء تعرف عادةً **بالفيزياء الفلكيّة**، وتركز على فهمنا النّظريّ السّابق للكون والأجسام الكونية اعتمادًا على نظرية آينشتاين للنسبية العامة ونظرية الجاذبيّة، وهنالك موضوعات أخرى في الفيزياء تؤخذ بالحسبان انطلاقًا من الكهرومغناطيسية، والدّيناميكا الحراريّة وصولا إلى الفيزياء الذّريّة والنّوويّة، بالإضافة إلى الجُسيمات الأولية. كما وتعدُّ نظريةُ النسبية العامة أيضًا أساسًا **لعلم الكونيّات الحديث**، وهو دراسة الكون كوحدة واحدة. يهتم علم الكونيّات خاصة بالبحث عن نظريات هيكلية لفهم الكون الملاحظ حولنا من حيث أصله ومستقبله. إنّ الأسئلة المطروحة من علم الكونيّات عميقة وصعبة، والإجابات المحتملة عليها في العادة لا يمكن تخيلها. وهنالك بعض الأسئلة التي يجب الإجابة عنها مثل: هل هذا الكون كان موجودًا دائمًا؟ هل له بداية زمنية؟

إنّ أيًّا من هذين السؤالين صعب تخيله: هل يمكن العودة بالزمن إلى الماضي عند بداية الكون؟ وماذا كان قبل ذلك؟ وماذا عن حجم الكون: هل هو محدود ؟ أم لا نهائي الحجم؟ إنّ تخيل الحالتين عملية عسيرة؛ فلو كان الكون محدودًا، فليس من المعقول السؤال عما وراءه، لأنّ الكون هو الموجود كلّه في هذه الحالة.

لقد حدث تطور كبير في الفيزياء الفلكيّة وعلم الكونيّات في السنوات القليلة الماضية، حتى أنّ كثيرًا من العلماء أطلقوا عليها العصر الذهبي لعلم الكونيّات. وسيكون عرضنا في هذا الفصل نظريًّا ولكننا سنتناول فيه معظم الأفكار المطروحة، وسنبدأ بنظرةٍ إلى ما نستطيع رؤيته من وراء نطاق كرتنا الأرضية.

1-33 النّجوم والمجرّات

وفقًا للنظريات القديمة، فإنّ النّجوم، باستثناء عدد قليل منها، تبدو متحركة (الكواكب)، وتكون ثابتة على كرة بعد آخر كوكب، فقد كان الكون منسجمًا ذاتيًّا، والأرض في مركزه أو بالقرب منه. ولكن في القرون التالية، فإنّ المشاهدات لأول تلسكوب صنعه جاليليو للسماء عام 1610 غيرت نظرتنا للكون بشكل جذريّ، ولم نعد نضع أنفسنا في مركز الكون، كما أنّ نظرتنا للكون أصبحت أكثر اتساعًا. إنّ المسافات الكونية كبيرة جدًّا بحيث نحددها بدلالة الزمن الذي يستغرقه الضّوء لقطع مسافة معينة. فعلى سبيل المثال، فإنّ الثّانية الضّوئيّة (light-second) تساوي

$$(3.0 \times 10^8\ \text{m/s})(1.0\ \text{s}) = 3.0 \times 10^8\ \text{m} = 300{,}000\ \text{km}$$

أمّا الدقيقة الضّوئيّة (light-minute) فتساوي 18×10^6 km، في حين تساوي السّنة الضّوئيّة (**light-year** $\equiv$ ly)

السّنة الضّوئيّة (وحدة)

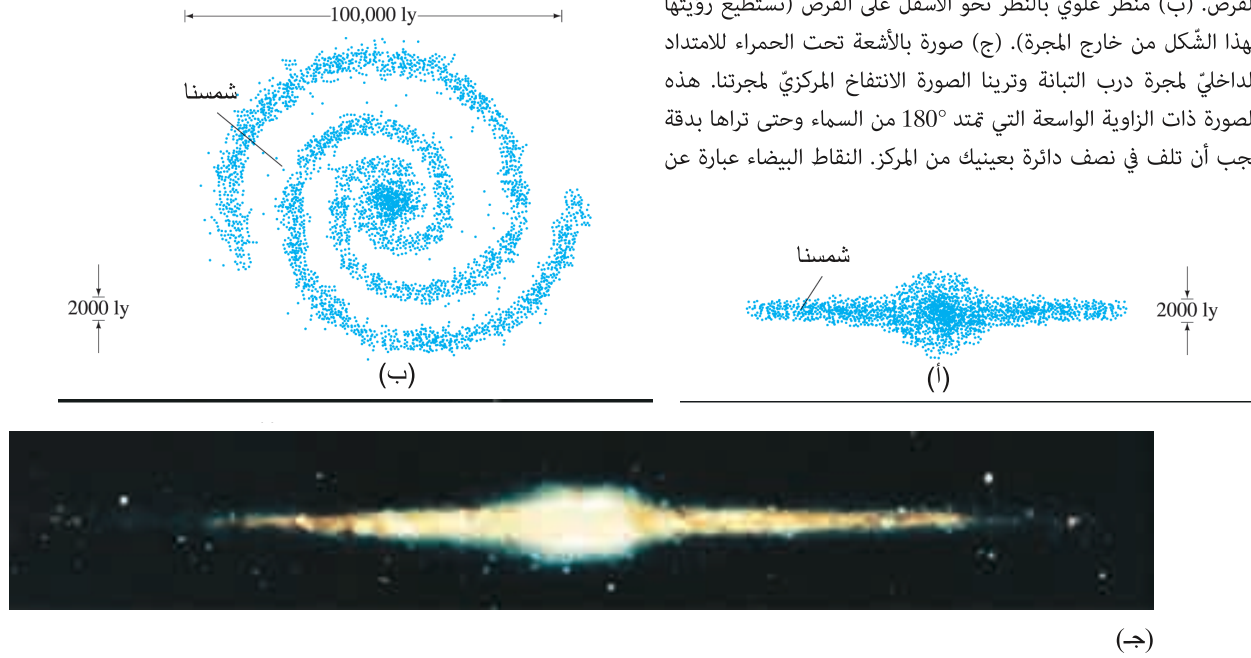
$$1\ \text{ly} = (2.998 \times 10^8\ \text{m/s})(3.156 \times 10^7\ \text{s/yr}) = 9.46 \times 10^{15}\ \text{m} \approx 10^{13}\ \text{km}$$

ولتحديد المسافة من الأرض إلى الشّمس أو القمر؛ فإنّنا نستخدم عادةً وحدة المتر أو الكيلومتر ولكن يمكن أن نحدّدها بدلالة سرعة الضّوء. إنّ المسافة بين الأرض والقمر تساوي 384,000 km وتساوي 1.28 ثانية ضوئية، أمّا المسافة بين الأرض والشّمس فتساوي 1.50×10^{11} m أو 150,000,000 km وهذه تساوي 8.3 دقيقة ضوئية. إذا سرنا مسافة أكبر في مجموعتنا الشّمسيّة فإنّ الكوكب التاسع (بلوتو) يبعد عن الشّمس مسافة 6×10^9 km، أو 6×10^{-4} ly.

إنّ أقرب نجم إلينا، عدا الشّمس، هو نجم بروكسيما سينتوري الذي يبعد عنّا مسافة 4.3 ly (لاحظ أنّ أقرب نجم يبعد عنا نحو 10,000 مرّة من أبعد نقطة في مجموعتنا الشّمسيّة.) وفي ليلة غير مقمرة، يمكن رؤية آلاف النّجوم بدرجات متفاوتة في الإضاءة، بما فيها منطقة كثيفة من النّجوم تشبه الغيمة تمتد بشكل طوليّ في وسط السماء تسمّى درب التبانة. أول ملاحظات جاليليو بالتسلكوب الذي صنعه هو أنّ درب التبانة هو تجمع هائل غير محدود من النّجوم المنفردة. وبعد نحو قرن ونصف (عام 1750 تقريبا) أشار توماس رايت إلى أنّ دربَ التبانة قرصٌ مسطح من النّجوم تمتد إلى مسافات كبيرة في مستوى نسميها المجرة (**Galaxy**)، وهي الكلمة الإغريقية المناظرة لدرب التبّانة. (شكل 33 – 1).



الشّكل 33 – 1: مقطع من مجرة درب التبانة، يمثّل الخطّ الرفيع مسار قمر أرضيّ صناعيّ.



الشّكل 33 – 2 مجرتنا كما تبدو من الخارج. (أ) منظر جانبيّ في مستوى القرص. (ب) منظر علويّ بالنظر نحو الأسفل على القرص (نستطيع رؤيتها بهذا الشّكل من خارج المجرة). (ج) صورة بالأشعة تحت الحمراء للامتداد الداخليّ لمجرة درب التبانة وترينا الصورة الانتفاخ المركزيّ لمجرتنا. هذه الصورة ذات الزاوية الواسعة التي تمتد $180°$ من السماء وحتى تراها بدقة يجب أن تلف في نصف دائرة بعينيك من المركز. النقاط البيضاء عبارة عن

إنّ قطر مجرّتنا يساوي 100,000 سنة ضوئية تقريبًا. وذات سمك يساوي نحو 2000 سنة ضوئيّة. ولها انتفاخ مركزيّ (نواة). وأذرع لولبية (الشّكل 33–2). وتقع شمسنا التي تبدو كنجم مجاور عند نصف المسافة بين مركز المجرة وحافتها تقريبًا. وتبعد نحو 26,000 سنة ضوئيّة عن المركز. تحتوي مجرتنا على حوالي 100 بليون (10^{11}) نجم. وتدور الشّمس في مدار حول مركز المجرة مرة كلّ 250 مليون سنة تقريبًا. وبالتالي تكون سرعتها نحو $200\ \text{km/s}$ بالنسبة إلى مركز المجرة. لقد قدّرت الكتلة الكلية للنجوم كلّها في مجرتنا بحوالي $3 \times 10^{41}\ \text{kg}$. وهي من المادة التقليدية. وبالإضافة إلى ذلك. هنالك دليل قوي على أنّ مجرتنا محاطة بهالة غير مرئية من مادة معتمة سنناقشها في (البند 33 – 8).

مثال 33-1 تقدير كتلة مجرتنا

احسب الكتلة الكلية لمجرّتنا باستخدام المعلومات المعطاة لدوران الشّمس (بالإضافة إلى نظامنا الشّمسيّ) حول مركز المجرة. افرض أنّ معظم كتلة المجرة مركّزة بالقرب من مركزها.

النّهج: نفرض أنّ الشّمس والنّظام الشّمسيّ (الكتلة الكلية m) يتحرك في مسار دائريّ حول مركز المجرة (كتلتها الكلية M). وأنّ هذه الكتلة M يمكن اعتبارها موضوعة في مركز المجرة. وبعد ذلك نطبّق قانون نيوتن الثاني. $F = ma$. حيث a هو التسارع المركزي $a = v^2/r$. و F هي قوة الجاذبيّة الناجّة من قانون الجذب العام (الفصل 5).

الحلّ: تدور شمسنا مع نظامنا الشّمسيّ حول مركز المجرة بسرعة تساوي $v = 200\ \text{km/s}$ تقريبًا وفقًا لأفضل الأقيسة كما ذكرنا سابقًا. وتقع على مسافة من مركز المجرة تساوي $r = 26{,}000\ \text{ly}$ تقريبًا. وباستخدام قانون نيوتن الثاني. نحصل على

$$F = ma$$

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

حيث M هي كتلة المجرة. في حين أنّ m هي كتلة شمسنا ونظامنا الشّمسي. وبحلّ المعادلة السابقة نحصل على

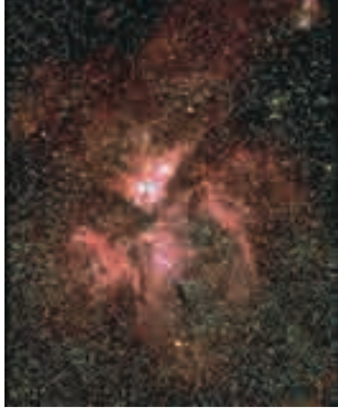
$$M = \frac{rv^2}{G} \approx \frac{(26{,}000\ \text{ly})(10^{16}\ \text{m/ly})(2 \times 10^5\ \text{m/s})^2}{6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2} \approx 2 \times 10^{41}\ \text{kg}$$

ملحوظة: بدلالة عدد النّجوم في مجرتنا. إذا كانت كتلة كلّ نجم مثل كتلة شمسنا $(m = 2.0 \times 10^{30}\ \text{kg})$. فسيكون لدينا نحو $(2 \times 10^{41}\ \text{kg})/(2 \times 10^{30}\ \text{kg}) \approx 10^{11}$ أو 100 بليون نجم تقريبًا.



الشّكل 33 – 3 هذا العنقود النّجميّ الكرويّ موجود في مجموعة هرقل النّجميّة.

الشّكل 33 – 4 هذا السّديم الغازيّ موجود في مجموعة كارينا النّجمية، ويبعد عنا حوالي 9000 سنة ضوئيّة.



وبالإضافة إلى النّجوم الموجودة داخل مجرة درب التبانة وخارجها، نستطيع أن نرى بالتلسكوب بقاعا غيميّة باهتة في السماء، تُسَمّى السُّدُم (nebulae). بعض من هذه السُّدُم موجودة في تجمعات أندروميدا وأوريون النّجمية، والتي يمكن تمييزها بالعين المجردة في الليالي الصافية. وهنالك بعض **العناقيد النّجميّة (الشّكل 33 – 3)** وهي مجموعات من النّجوم كثيرة العدد، والتي تظهر على شكل غيمة. كما أنّ هناك غيومًا متوهّجة من الغاز أو الغبار (الشّكل 33 – 4). ولهذا، فإنّنا نستخدم الآن كلمة **سديم**. أمّا أكثرها سحرًا فهي تلك التي تعود إلى فئة ثالثة، والتي عادةً ما يكون لها شكل إهليلَجيّ، وتبدو على مسافة هائلة خارج مجرتنا. ويبدو أنّ إيمانويل (حوالي عام 1755) هو أول من اقترح أنّ هذه الأخيرة قد تكون أقراصًا دائرية، ولكنها تبدو إهليلَجيّة لأنّنا نراها بزاوية معينة، وتكون باهتة لأنّها على مسافة كبيرة. في البداية، لم يُقبل عالميًّا أنّ هذه الأجسام خارج مجرتنا. لقد أظهرت التّلسكوبات الكبيرة التي صمّمت في القرن العشرين أنّ النّجوم المنفردة يمكن أن تكون من ضمن التي تقع خارج المجرة، والتي يحتوي الكثير منها على أذرع لولبية. كما قام إدوين هابل (1889 – 1953) بالكثير من هذه المشاهدات العملية في عشرينيّات القرن الماضي (1920 s) باستخدام تلسكوب قطره (100-inch) 2.5-m بالقرب من لوس أنجلوس في كاليفورنيا. وبعدها، أصبح الكون أكثر اتساعًا. أظهر هابل أنّ هذه الأجسام، في الواقع، تقع خارج مجرتنا بسبب بعدها الكبير. إنّ المسافة لأقرب مجرّة عنا،** وهي مجرة أندروميدا، أكبر من مليوني سنة ضوئيّة، وهي مسافة أكبر بعشرين مرة من قطر مجرتنا. ويبدو منطقيًّا أنّ هذه السُّدُم هي **مجرات** مشابهة لمجرتنا (لاحظ أننا، عادة، نستخدم لفظ المجرة للإشارة إلى مجرتنا). ومن المعتقد أنه في هذه الأيام لدينا حوالي 40×10^9 مجرة في الكون المشاهد. وهذا عدد تقريبيّ؛ لأنّ هنالك عدة مجرات تبدو كنجوم في مجرات أخرى. انظر (الشّكل 33-5).
عدة مجرات تبدو في مجموعات على شكل **مجره عنقودية** ترتبط مع بعضها بقوة الجذب الكتلية المتبادلة. ومن الممكن أن يكون في أيّ مكان بعض من المجرات في كلّ عنقود أو عدة آلاف منها.

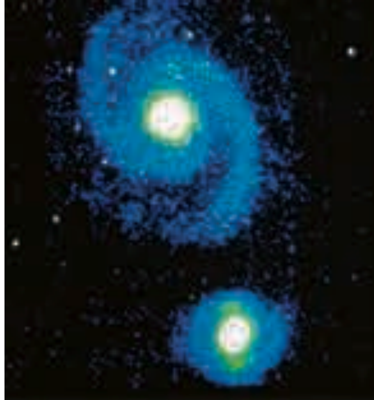
* (100 inches =) 2.5 m تشير إلى قطر المرآة الشيئية المحدبة. كلّما كبرت المرآة، كلما جمعت كمية أكبر من الضوء (كثافة أكبر) وكلّما قل حيود الضوء (الوضوح وقوة التمييز) وبالتالي يمكن رؤية نجوم اكثر وخاصة الخافتة منها. ارجع الى الفصل 25. بقيت الألواح/أو الافلام الفوتوغرافية حتى وقت قريب هي ما يستعمل في الحصول على صور تحتاج الى وقت طويل للتعرف للضوء، أما الآف فتستخدم اجهزة استشعار الحالة الصلبة CCD (الفصل 25-1) وهي متوفرة بقوة 100 جيجا بكسل بالمقارنة مع 5 او 6 ميجابكسل تتوفر في الكاميرات الرقمية.

**غيوم مجلان أقرب إلينا من مجرة اندروميدا، ولكنها صغيرة لدرجة أنّها تعتبر مجرات تابعة لمجرتنا.

الشّكل 33 – 5 صور للمجرات. (أ) مجرة لولبية في مجموعة هيدرا النّجمية. (ب) مجرتان؛ الكبيرة منها والأكثر إثارة تعرف باسم مجرة الحوض الدوار. (جـ) صورة بالأشعة تحت الحمراء بألوان غير حقيقية للمجرتين الموضحتين في الشّكل (ب)، وهنا تبدو الأذرع اللولبية أكثر انتظامًا من الصورة بالضّوء المرئيّ (ب)، الألوان المختلفة تعود إلى اختلاف الكثافات الضّوئيّة. يتبعثر الضّوء المرئيّ (أو يُستطار) ويمتصّ من الغبار الكونيّ أكثر من الأشعة تحت الحمراء. لذلك، فإنّ الأخيرة تظهر صورة أكثر وضوحًا.


(أ)


(ب)


(جـ)

بالإضافة إلى ذلك، فإنّ العناقيد نفسها تبدو مرتبة في تجمعات أكبر تُسَمّى **عناقيد فائقة** (**super clusters**). أبعد مجرّة مرصودة تقع على مسافة من الرتبة 1010 سنة ضوئيّة. انظر (الجدول 33 – 1).

الجدول 33 – 1 المسافات السّماويّة

الكوكب	المسافة من الأرض تقريباً
قمر	4×10^{-8}
شمس	1.6×10^{-5}
حجم النظام الشمسي (المسافة للوصول إلى بلوتو)	6×10^{-4}
أقرب نجم (بروكسيما ستوري)	4.3
وسط مجرتنا	2.6×10^{4}
أقرب مجرة كبيرة	2.4×10^{6}
أبعد المجرات	10^{10}

مثال مفاهيمي 33–2 **النظر إلى الزمن الماضي**

يرى الفلكيون تلسكوباتهم عادة كآلة زمنية تنظر إلى الزمن الماضي لمعرفة أصل الكون. ما الزمن الماضي الذي يمكن رصده؟

الإجابة: تقيس المسافةُ بالسنة الضّوئيّة بدقة الزّمنَ بالسنوات الذي يستغرقه الضّوء للوصول إلينا. وعليه، فإنّ (الجدول 33 – 1) يخبرنا عن الزمن الماضي الذي يمكن رصده. فعلى سبيل المثال، إذا شاهدنا انفجار قنطورس الأكبر إلى سوبرنوفا اليوم فهذا يعني أنّ هذا الحدث قد ظهر حقيقة قبل 4.3 سنة ماضية. إنّ أبعد مجرة مرصودة والتي تقع على مسافة 10^{10} سنة ضوئية تبعث ضوءًا إذا رأيناه هذه الأيام، فإنّها تكون قد بثته قبل 10^{10} سنة، وهي فترة قريبة من فترة نشوء الكون.

التمرين أ: افرض أنّنا نستطيع رؤية مرآة ضخمة على بعد سنة ضوئية واحدة عنّا. ماذا سنرى في هذه المرآة إذا واجهناها ونحن على سطح الأرض؟ قد تُسَمّى هذه آلة زمن.

بالإضافة إلى النّجوم العادية، والعناقيد النّجميّة، والمجرات، والعناقيد المجرية، والعناقيد الفائقة، فإنّ الكون يحتوي على أجسام أخرى مثيرة، من أمثلتها نجوم تُسَمّى العمالقة الحُمُر، والأقزام البيض، والنّجوم النيوترونية، ونجوم متمددة تُسَمّى النوفا والنوفا الفائقة (سوبرنوفا)، والثّقوب السّود التي لها قوة جاذبية عالية لا يستطيع حتى الضّوء الإفلات منها. بالإضافة إلى ذلك، هنالك إشعاعات كهرومغناطيسيّة تصل الأرض ولكنها لا تنبعث من الأجسام النقطية المضيئة التي نسميها النّجوم، وهي خلفية الميكروويف الإشعاعية، والتي تظهر بانتظام من الاتجاهات كافة في الكون. وسوف نناقش لاحقًا هذه الظواهر جميعها.

أخيرًا، فإنّ هنالك الأنوية المجريّة الفاعلة (AGN) وهي مصادر نقطية مضيئة جدًّا في مراكز المجرات وأكثر مثال مثير لها هو شبيهات النّجوم (كريزارس) والتي تكون مضيئة جدًّا، وتحجب الأضواء النّجمية التي تحيط بها. ويعتقد أنّ إضاءتها تأتي من المادة التي تبدأ بالسقوط في الثّقوب السّود في مراكز المجرات.

شبيهات النّجوم (Quasars)

2-33 تطوّر النّجوم: ولادة النّجوم وموتها

تبدو النّجوم غير متغيرة، وليلة بعد أخرى، فإنّ السماء لا يبدو عليها أيّ تغيّر ملحوظ. في الواقع، وبمقياس الإنسان الزمني، فإنّ الأكثرية السّاحقة للنجوم تتغير بشكل بسيط جدًّا (باستثناء النوفا والسوبرنوفا وبعض النّجوم المتغيرة). وعلى الرغم من أنّ النّجوم تبدو ثابتة بالنسبة إلى بعضها بعضا، فإنّ الكثير منها يتحرك بشكل يسمح بكشفه. إنّ سرعة النّجوم بالنسبة إلى النجوم المجاورة يمكن أن تكون مئات الكيلومترات في الثانية الواحدة، ولكن المسافة الهائلة التي تفصلها عنا تجعل هذه الحركة ممكنة الرصد بواسطة قياسات دقيقة فقط. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هنالك مدى هائلا من الإضاءة بين هذه النّجوم، وأنّ الفرق في الإضاءة يعود إلى الفرق في كمية ضوء النّجوم المنبعثة بالإضافة إلى المسافات المختلفة للنجوم عنا.

لمعان النجوم وسطوعها

هنالك معامل مفيد للنجم أو المجرة وهو **السّطوع** (أو السّطوع المطلق)، ويرمز إليه بالرمز (L). ويعني القدرة الكلية المشعة بوحدة الواط. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هنالك معاملا آخر هو **البريق الظاهري** (l) الذي يعرف بأنه القدرة التي تقطع وحدة المساحة من سطح الأرض عموديًا على مسار الضّوء. إذا أعطيت أنّ الطاقة محفوظة، وبإهمال أيّ امتصاص في الفضاء، فإنّ القدرة الكلية المنبعثة L عندما تجتاز مسافة d من النّجم سوف تنتشر على كرة مساحة سطحها $4\pi d^2$. وإذا كانت d هي المسافة من النّجم إلى الأرض، فإنّ L يجب أن تساوي $4\pi d^2$ مضروبة في l (القدرة بوحدة المساحة على سطح الأرض). أي أنّ

$$l = \frac{L}{4\pi d^2} \qquad (1 - 33)$$

مثال 33-3 البريق الظاهريّ

افرض أنّ نجمًا معيّنًا له سطوع مطلق يساوي السّطوع المطلق للشّمس، ولكنه يبعد $10\,\text{ly}$ عن الأرض. ما النسبة بين بريقه الظاهري والبريق الظاهري للشّمس؟

النّهج: السّطوع L لكلا النّجمين متساوٍ، لذا، فإنّ البريق الظاهري يعتمد فقط على بعديهما عن الأرض. ونستخدم قانون التربيع العكسي الموضح في (المعادلة $33-1$) لإيجاد البريق الظاهري النسبي.

الحلّ: باستخدام (المعادلة $33-1$)، فإنّ النّجم يبدو أكثر بريقًا من الشّمس بنسبة

$$\frac{l_{\text{star}}}{l_{\text{Sun}}} = \frac{d_{\text{Sun}}^2}{d_{\text{star}}^2} = \frac{(1.5 \times 10^8\,\text{km})^2}{(10\,\text{ly})^2(10^{13}\,\text{km/ly})^2} \approx 2 \times 10^{-12}.$$

لقد بينت دراسات دقيقة للنجوم القريبة أنّ السّطوع المطلق يعتمد على الكتلة؛* فكلما كانت كتلة النّجم أكبر كان سطوعه أكبر. وهنالك عامل مهم آخر للنجم هو درجة حرارة سطحه، والتي يمكن إيجادها من الطيف أو الترددات الكهرومغناطيسية التي يبثها. تمامًا كالجسم الأسود (البند $27-2$). وكما رأينا في (الفصل 27)، فإنّه كلما ازدادت درجة حرارة الجسم، انزاح الطيف بعيدًا عن الترددات المنخفضة (الأطوال الموجيّة الأعلى كالأحمر) باتجاه الترددات العالية (الأطوال الموجيّة الأقلّ كالأزرق). وبشكل كمّيّ، فإنّ العلاقة التي اقترحها فين (العلاقة $27-2$): طول موجة الذروة λ_P للطيف النّاتج عن الضّوء المنبعث من الجسم الأسود (والنّجوم تقريبًا عبارة عن جسم أسود) تتناسب عكسيًّا مع درجة حرارته T بالكلفن، أي أنّ: $\lambda_P T = 2.90 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}$. وتتراوح درجة حرارة سطح النّجوم إلى حدّ ما بين $3500\,\text{K}$ (المائل للأحمر) إلى $50.000\,\text{K}$ (UV) (فوق البنفسجي).

تزداد شدة الاستضاءة بازدياد كتلة النجم

مثال 33-4 تحديد درجة حرارة النّجم وحجمه

افرض أنّ المسافة بين الأرض ونجمين متقاربين يمكن تقديرها بشكل معقول، وأنّ البريق الظاهري المقيس لهما يدُلّ على أنّ كلا النّجمين لهما السطوع المطلق L نفسه. يعطي طيف أحد النّجمين قيمة قصوى عند طول موجيّ يساوي $700nm$ تقريبًا (مائل للأحمر)، في حين يعطي طيف النّجم الأحمر هذه القيمة عند $350nm$ تقريبًا (مائل للأزرق). استخدم قانون فين (المعادلة $27-2$) ومعادلة ستيفن – بولتزمان (البند $14-8$) لإيجاد: (أ) درجة حرارة سطح كلا النّجمين. (ب) كم يكبر أحد النّجمين عن الآخر؟

النّهج: نجد درجة حرارة سطح كلًّا النّجمين باستخدام قانون فين، وبعد ذلك نستخدم معادلة ستيفن – بولتزمان (تتناسب القدرة المعطاة أو السّطوع مع $\propto AT^4$). وعليه، نستطيع تحديد النسبة بين مساحتي سطح النّجمين، ومن ثَمَّ النسبة بين حجميهما.

الحلّ: (أ) ينصّ قانون فين (المعادلة $27-2$) على أنّ $\lambda_P T = 2.90 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}$. لذا، تكون درجة حرارة النّجم المائل للأحمر هي

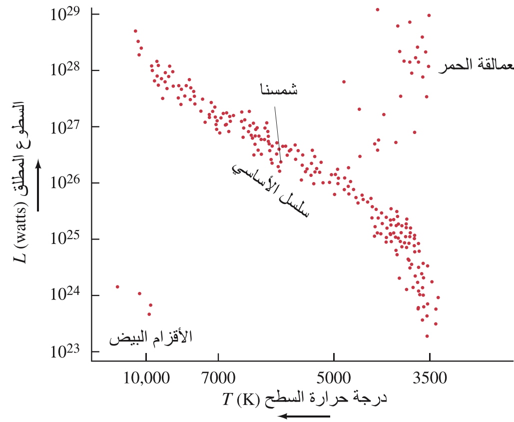
$$T_r = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}}{700 \times 10^{-9}\,\text{m}} = 4140\,\text{K}.$$

وتكون درجة حرارة النّجم المائل للأزرق ضعف هذه القيمة؛ لأنّ الطول الموجيّ يساوي النصف ($350\,\text{nm}$ مقابل $700\,\text{nm}$). وللتأكد؛ نطبّق المعادلة مرة أخرى فنحصل على

$$T_b = \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}}{350 \times 10^{-9}\,\text{m}} = 8280\,\text{K}.$$

(ب) معادلة بولتزمان – ستيفن والتي ناقشناها في (الفصل 14) (انظر المعادلة $14-5$) تنصّ على أنّ القدرة الإشعاعية المنبعثة بوحدة المساحة من الجسم تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة بالكلفن T^4. والآن، فإنّ درجة حرارة النّجم (المائل للأزرق) ضعف درجة حرارة النّجم (المائل للأحمر)؛ أي أنّ النّجم المائل للأزرق يبث طاقة بوحدة المساحة أكبر بـ $(2^4) = 16$ مرة من النّجم (المائل للأزرق). أعطينا أنّ النّجمين لهما السّطوع نفسه (القدرة المعطاة نفسها)، وأنّ مساحة النّجم الأزرق تساوي $\frac{1}{16}$ من مساحة النّجم الأحمر). وحيث إنّ مساحة السطح تساوي $4\pi r^2$، فإنّنا نستنتج أنّ نصف قطر النّجم الأحمر يساوي $\sqrt{16}$ مرات أكبر من النّجم الأزرق. إذن، فحجمه أكبر $4^3 = 64$ مرة من النّجم الأحمر.

* ينطبق على النجوم" تسلسل رئيسي" (انظر الصفحة التالية)، ويمكن تحديد كتلة نجم من خلال مراقبة آثاره الجانبية.العديد من النجوم هي جزء من الكتلة.وأبسط كونها نجمة ثنائية في اثنين من النجوم التي تدور حول بعضها البعض.بما يسمح تحديد الجماهير وذلك باستخدام ميكانيكا التناوب.



الشّكل 33 – 6 مخطط هيتزبرنغ – رسل (H – R). لاحظ أنّ درجة الحرارة تزداد نحو اليسار.

<u>مخطّط (H – R)</u>

مخطط H - R

هناك اكتشاف فلكيّ مهم تمّ الوصول إليه في عام 1900 تقريبا. وهو أنّه لمعظم النّجوم، يرتبط اللون بالسّطوع المطلق، أي بالكتلة. وهناك طريقة مفيدة لتمثيل هذه العلاقة هي ما يُسَمّى مخطّط هيتزبرنغ – رسل (H – R). في مخطط (H – R)، يشير المحور الأفقي إلى درجة الحرارة T، في حين يمثّل المحور العمودي السّطوع L، وكلّ نجم يُمثّلُ بنقطة على هذا المخطط. (الشّكل 33 – 6).

نجوم التسلسل الرئيس

تقع معظم النّجوم على الخط القطريّ الذي يعرف **بالتّسلسل الأساسيّ (main sequence)**. إذا بدأنا من أسفل اليمين، فسنجد النّجوم الأبرد، وهي النّجوم الأكثر احمرارًا، والأقلّ سطوعا. لذا، فكتلها أقلّ. وإذا ابتعدنا إلى اليسار أكثر فإنّنا نجد النّجوم الأكثر حرارة، والأكثر سطوعًا، وهي النّجوم البيضاء، كشمسنا. أمّا إذا ابتعدنا أكثر إلى اليسار، فسنجد النّجوم الأكبر كتلة، والأكثر سطوعًا، وذات اللون الأزرق. تسمّى النّجومُ التي تقع على هذا الخطّ القطري نجومَ التسلسل الأساسي. وهناك أيضًا نجوم تقع خارج هذا التسلسل الأساسي. وفي أعلى اليمين، نجد النّجوم المتطرفة الكبيرة التي يكون لها سطوع كبير، ولكن يكون لها لون أحمر، وحرارة منخفضة، وتُسَمّى **العمالقة الحمر (red giants)**. وفي أسفل اليسار، نجد عددًا قليلا من النّجوم ذات سطوع قليل، وبدرجة حرارة عالية تُسَمّى **الأقزام البيض (white dwarfs)**.

العمالقة الحمر
الأقزام البيضاء

مثال 33-5 تقدير بعد النجوم باستخدام مخطط H-R واللون

افرض أنّ تفاصيل دراسة نجم معين أشارت إلى أنه يقع على التسلسل الأساسي لمخطط H – R. إذا كان بريقه الظاهري هو $l = 1.0 \times 10^{-12}\,\text{W/m}^2$ والطول الموجي المقابل لأقصى نقطة على طيفه هو $\lambda_P \approx 600$. فقدّر بعده عنا.

النّهج: نجد درجة الحرارة باستخدام قانون فين. (المعادلة 27 – 2). السّطوع المطلق له يقدر من موقعه على التسلسل الأساسي في مخطط H – R في (الشّكل 33 – 6). ثم نجد المسافة باستخدام المعادلة 33 – 1.

الحلّ: من قانون فين (المعادلة 27 – 2)، فإنّ درجة حرارة النّجم تساوي

$$T \approx \frac{2.90 \times 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}}{600 \times 10^{-9}\,\text{m}} \approx 4800\,\text{K}.$$

وعند درجة الحرارة هذه، فإنّ النّجم على التسلسل الأساسي في مخطط H – R سيكون له سطوع مطلق يساوي $L \approx 1 \times 10^{26}\,\text{W}$ تقريبًا. وبالقراءة من (الشّكل 33 – 6). وبالتالي من (المعادلة 33 – 1) نحصل على

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \approx \sqrt{\frac{1 \times 10^{26}\,\text{W}}{4(3.14)(1.0 \times 10^{-12}\,\text{W/m}^2)}} \approx 3 \times 10^{18}\,\text{m}.$$

وتكون مسافته عنا بالسنة الضوئية

$$d = \frac{3 \times 10^{18}\,\text{m}}{10^{16}\,\text{m/ly}} \approx 300\,\text{ly}.$$

التمرين ب قدر بعد نجم درجة حرارته $6000\ K$ وسطوعه الظاهري $2.0 \times 10^{-12}\,\text{W/m}^2$

التطور النّجمي؛ السّلسلة النّوويّة

السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو: لماذا هذه الأنّواع المختلفة من النّجوم مثل العمالقة الحمر، والأقزام البيض، ونجوم التسلسل الأساسي؟ هل ولدت جميعها في البداية بالطريقة نفسها وبالزمن ذاته؟ أم أنّ الأنّواع المختلفة تمثل أعمارًا مختلفة في دورة حياة كلّ نجم؟ لاحظ أننا لا نستطيع تتبع حياة أيّ نجم لأنّ أصغرَ جزء من دورة حياة أيّ نجم أكبرُ بكثير من الحياة التي نعيشها، وقد تصل إلى ملايين أو بلايين السنوات. ومع هذا، دعنا نتتبع آلية **تطور نجم** من ولادته وحتى مماته، كما صممها نظريًّا الفيزيائيون الفلكيون هذه الأيام.

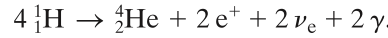
ولادة نجم

يُعتقد أنّ النّجوم تولد عندما تنقبض غيمة غازية (معظمها من الهيدروجين) بسبب شدّ قوة الجاذبيّة. الغيمة الموجيّة الضخمة من الممكن أن تتجزأ إلى عدة كتل متمركزة، وكلّ منها يتمركز في الحيّز الذي تكون فيه الكثافة أكبر قليلا من النقاط المجاورة، وبالتالي فإنّ كلّ كريّة متكونة تعمل الجاذبيّة على انجذابها باتجاه مركز كتلتها. وعندما تتسارع جسيمات هذا النّجم الأوّلي، فإنّ طاقتها الحركية تزداد. وإذا أصبحت الطاقة الحركية عالية بشكل كافٍ، فإنّ قوى التنافر الكولومية بين الشحنات الموجبة لا تكون قوية بشكل كافٍ لإبقاء أنوية الهيدروجين بعيدة عن بعضها، مما يؤدي إلى حدوث اندماج نووي. وفي نجم كشمسنا، فإنّ حرق (H_2) الهيدروجين* (أي حدوث الاندماج) يظهر بطريقة حلقة البروتون – بروتون (الجزء 31 – 3، المعادلات 31 – 6).

الانقباض نتيجة الجاذبيّة.

يحدث الاندماج عندما تكون T كبيرة و $\overline{KE}$ بشكل كافٍ

وفيها تندمج أربعة بروتونات لتكون نواة ^4_2He مع انبعاث أشعة جاما وبوزيترونات ونيوترينوات:



$$4\,^1_1H \rightarrow \,^4_2He + 2\,e^+ + 2\,\nu_e + 2\,\gamma.$$

تحتاج هذه التفاعلات إلى درجة حرارة تساوي نحو 10^7 K، وتقابل متوسط طاقة حركية (kT) تساوي 1 keV تقريبًا (المعادلة 13 – 8). وفي النّجوم ذات الكتل الأكبر، فإنّ حلقة الكربون تنتج الأثر نفسه؛ أربع أنوية من ^1_1H تنتج ^4_2He نواة (انظر البند 31 – 3). يحدث تفاعل الاندماج بدايةً في قلب النّجم، حيث تكون درجة الحرارة T عالية بما فيها الكفاية. (تكون درجة حرارة سطح النّجم بالطبع أقلّ كثيرًا، وبرتبة تصل إلى بعض الآلاف من الكلفن). وينتج الانطلاق المروّع للطاقة في هذه التفاعلات الاندماجيّة ضغطًا خارجيًّا كافيًا لإيقاف التجاذب الكتلي للداخل. وهنا، تشكل البروتونات النّجمية نجمًا يافعًا يثبت على التسلسل الأساسي. وعندما يقع النّجم على التسلسل الأساسي، فإنّ هذا يعتمد تمامًا على كتلته. وكلما كان النّجم ذا كتلة أكبر وقع إلى الأعلى (وإلى اليسار) في مخطط H – R في (الشّكل 33 – 6). ولاجتياز التسلسل الأساسي؛ فإنّنا نحتاج إلى 30 مليون سنة إذا كان النّجم مثل شمسنا، مع العلم أنّه من المتوقع بقاؤه في موقعه ** هذا على التسلسل الأساسي نحو 10 بلايين سنة (10^{10} yr)

حلقة البروتون - حلقة بروتون

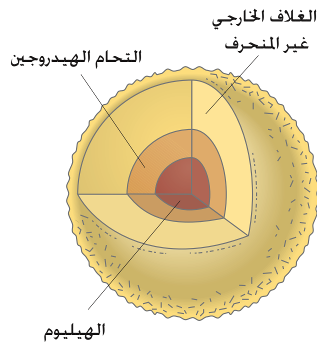
حلقة بروتون

وعلى الرغم من أنّ معظم النّجوم يصل عمرها إلى بلايين السنين، إلا أنّ هنالك دلائل على حقيقة أنّ بعض النّجوم تولد في هذه اللحظة. عندما يندمج الهيدروجين لتكوين الهيليوم، فإنّ الهيليوم المتكوّن يصبح أكثر كثافة، ويتجه للتكتل في القلب المركزي الذي تشكّل فيه. وكلما نما قلب الهيليوم، استمر الهيدروجين بالاندماج في قشرة حوله، انظر إلى (الشّكل 33 – 7). عندما تستهلك كمية كبيرة من الهيدروجين داخل القلب، فإنّ إنتاج الطاقة يقلّ في المركز، ولا يطول الأمر بشكل يكفي لإعاقة قوة الجاذبيّة الهائلة، وهو ما يجعل القلب ينقبض ويزداد حرارة، ويندمج الهيدروجين في القشرة حول القلب بشكل عنيف بسبب ارتفاع الحرارة، مما يسبب تمدد الغلاف الخارجي وبرودته، وبالتالي، فإنّ درجة حرارة سطح النّجم تقلّ مما يؤدي إلى إنتاج طيف ضوئيّ تكون قمته على طول موجي أكبر (أكثر احمرارًا).

حلقة الكربون

اجتياز التسلسل الأساسي

الشّكل 33 – 7 حرق الهيدروجين (اندماجه لتكوين الهيليوم) يحيط بالقلب حيث يتكتل الهيليوم المتكوّن حديثًا.

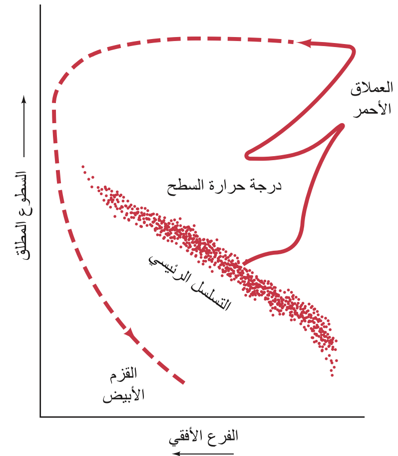


* تستخدم كلمة حرق في تفاعلات الاندماج ذات الحرارة العالية، والتي تحدث بعملية نووية" ولا تقارن بعملية الاحتراق العادية (مثل احتراق الورق، أو الخشب، أو الفحم) والتي هي عبارة عن تفاعل كيميائيّ يحدث على مستوى الذرة (وله درجة حرارة أقلّ بكثير).

** بما أن النجوم الكبيرة اكثر سخونة ويمكن التغلب على قوى التنافر بسهولة اكبر، فإنها تحترق بسرعة اكبر، وبالتالي تستنفذ وقودها بسرعة مما يؤدي الى فترة حياة أقصر، فمثلًا، نجم بكتلة تساوي 10 أضعاف كتلة شمسنا، فستعيش مدة أطول من فترة حياة شمسنا 10^{10} yr.

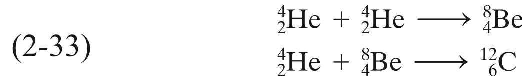
العمالقة الحمر

حتى هذا الوقت، يكون النّجم إلى يسار التسلسل الأساسي. يصبح النّجم أكثر احمرارًا، وعندما يزداد حجمه، يصبح أكثر سطوعًا. وبعد ذلك، يبدأ بالتحرك نحو اليمين وإلى الأعلى على مخطط $H-R$ كما هو موضّح في (الشّكل 33 – 8). وكلما تحرّك إلى الأعلى، فإنّه يقترب من مرحلة **العمالقة الحُمْر**. لذا، فإنّ النّظريات تناقش أصل العمالقة الحمر كخطوة طبيعية لتطور النّجم. إنّ شمسنا، على سبيل المثال، موجودة في التسلسل الأساسي منذ $4\frac{1}{2}$ بليون سنة تقريبًا، وستبقى هناك مدة 4 أو 5 بلايين سنة أخرى. وعندما تغادر شمسنا التسلسل الأساسي، فمن المتوقع أن ينمو قطرها (عندما تصبح عملاقًا أحمر) أكبر 100 مرة أو أكثر، وعندها ستبتلع كوكبًا أو أكثر من الكواكب الداخلية (المريخ، الزهرة وربما الأرض).



الشكل 33 – 8 مسار تطوّر نجم مثل شمسنا ممثلا على مخطط $H-R$.

وإذا كان النّجم كبيرًا كشمسنا، فإنّ انشطارات أكثر يمكن أن تحدث. وعندما تصل درجة الحرارة إلى حوالي 10^8 K، فإنّه حتى أنوية الهيليوم بالرغم من شحنتها الأكبر وبالتالي التنافر الكهربائي الأكبر، يمكن أن تقترب من بعضها لتعمل اندماجًا تكون تفاعلاته كما يلي:



$$\begin{aligned} {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} &\longrightarrow {}^8_4\text{Be} \\ {}^4_2\text{He} + {}^8_4\text{Be} &\longrightarrow {}^{12}_6\text{C} \end{aligned} \qquad (2\text{-}33)$$

مع انبعاث فوتونين من أشعة γ. هذان التّفاعلان يظهران بشكل سريع على التوالي (لأنّ غير مستقر بشكل كبير) وبالتالي يكون التأثير النهائي لهذه التّفاعلات:



$$3\,{}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{12}_6\text{C}. \qquad (Q = 7.3\ \text{MeV})$$

يسبب هذا الاندماج للهيليوم تغيرًا في النّجم الذي يتحرك بسرعة على التفرع الأفقي على مخطط $H-R$ (الشّكل 33 – 8). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ تفاعلات الاندماج النووي لـ ${}^4_2\text{He}$ مع ${}^{12}_6\text{C}$ ممكنة لتكوين ${}^{16}_8\text{O}$. وفي النّجوم ذات الكتل الأكبر، فإنّ عناصر لها عدد ذري (Z) أكبر مثل ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ أو ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ يمكن أن تتكوّن. وتسمّى هذه الآليةُ لتكوين أنوية أثقل من أنوية أخف (أو بامتصاص النيوترونات والذي يظهر عند الأعداد الذّريّة الأكبر) **السلسلةَ النّوويّةَ**.

إنّ نهاية النّجم تعتمد على كتلته؛ فالنّجوم تفقد الكتلة التي تتسرب من غلافها إلى الفضاء الخارجي. تولد النّجوم بكتلة تساوي 8 أو 10 أضعاف كتلة الشّمس، وتنتهي أخيرا بكتلة متبقية أقلّ من حوالي 1.4 من كتلة الشّمس، والتي تعرف باسم نهاية غاندراسيخر وعند هذه الكتلة لا يمكن أن يظهر مزيدًا من طاقة الاندماج النووي.

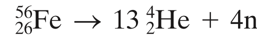
السّلسلة النّوويّة

قلب هذا النّجم قليل الكتلة (الذي كتلته الأساسية $\gtrsim 8$ كتل شمسية)، ويتقلص تحت تأثير الجاذبيّة، ويتمدد غلافه الخارجي مرة أخرى، ويصبح النّجم عملاقًا أحمر كاملا. وأخيرا، تتسرب الطبقة الخارجية إلى الفضاء، وينكمش القلب، ويبرد النّجم. وإلى حدّ نموذجي يتبع المسار الموضح في (الشّكل 33 – 8)، و من ثَمّ يهبط إلى الأسفل ليصبح قزمًا أبيض. إنّ القزم الأبيض بكتلة تساوي كتلة الشّمس له حجم يساوي حجم الأرض. إنّ **القزم الأبيض** يتقلص إلى النقطة التي تبدأ عندها غيمة الإلكترونات بالتداخل، ولكنها لا تنهار أكثر بسبب مبدأ باولي للاستثناء، والذي ينصّ على أنه لا يمكن لإلكترونين أن يكونا في المستوى الكمّيّ نفسه. إنّ الوصول إلى هذه النقطة يُسَمّى تشعب الإلكترون $(\textit{electron degeneracy})$. ويستمر القزم الأبيض في فقدان طاقته الداخلية بالإشعاع فتقل حرارته، ويصبح باهتًا إلى أن يفقد ضوءه تمامًا، وعندها يصبح كومة رماد باردة ومظلمة. ويعتقد بأنّ النّجومَ التي كتلتها المتبقية أكبر من نهاية غاندراسيخر التي تساوي 1.4 من كتلة الشّمس (كتلتها الأصلية أكبر من 8 أو 10 مرات كتلة الشّمس) تتبعُ نمطًا مختلفًا؛ فالنّجوم بهذه الكتلة الكبيرة يمكن أن تنكمش وتزداد حرارتها بشكل أكبر. إنّ الأنّوية التي بثقل ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ و ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ في المدى $T = 2.5-5 \times 10^9$ K ، يمكن أن تتشكل. وهنا يتوقف تكوّن الأنّوية الثقيلة من الأنّوية الأخف منها بواسطة الاندماج. وكما رأينا في (الشّكل 30 – 1)، فإنّ متوسط طاقة الربط لكلّ نيوكليون تبدأ بالتناقص عند عدد كتلي A أكبر من حوالي 60. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ الاندماج يحتاج إلى طاقة أكثر من التي يطلقها العناصر الأثقل من النيكل (Ni) يعتقد أنها تتكون أساسًا من التقاط النيوترون، وبشكل جزئيّ في انفجار السوبرنوفا. عدد كبير من النيوترونات الحرة ينتج من التفاعلات النّوويّة، ويظهر داخل النّجوم وتستطيع أن تتحد مع نواة ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ على سبيل المثال لتكوين (عند التقاط ثلاثة منها) نواة ${}^{59}_{26}\text{Fe}$. وتستطيع نواة ${}^{59}_{27}\text{Co}$ اقتناص نيوترونات، فتصبح غنية بالنيوترونات، وتنحل بعدها بإصدار β^- وتنتج العنصر الذي يليه مباشرة في الترتيب الدوري بالنسبة للعدد الذري Z، وهكذا. العناصر الأكبر في العدد الذري Z يعتقد أنها تتكون بطريقة مشابهة بالتقاط النيوترونات خلال انفجار السوبرنوفا عندما تتوافر مجموعة من النيوترونات.

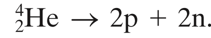
الأقزام البيض

إنتاج الأنّوية الثقيلة

علاوة على ذلك، وعند درجات الحراريّة العالية جدًّا هذه، والتي تكون أكبر من 10^9K، فإنّ الطاقة الحراريّة للأنوية تكون عالية جدًّا بحيث يبقى اندماج الأنوية الأثقل من الحديد ممكنًا حتى لو احتاج التفاعل إلى طاقة مدخلة. ولكن الطاقة العالية للاصطدامات يمكن أن تسبب تحطم النيكل أو الحديد لتكوين أنوية الهيليوم He التي تنحلّ بدورها إلى بروتونات ونيوترونات

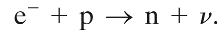


$$^{56}_{26}\text{Fe} \rightarrow 13\,^{4}_{2}\text{He} + 4\text{n}$$



$$^{4}_{2}\text{He} \rightarrow 2\text{p} + 2\text{n}.$$

وهذه التفاعلات تحتاج إلى طاقة (ماصة للحرارة)، ولكن عند درجة حرارة وضغط عاليين جدًّا، فإنّ الطاقة تكون متوافرة بما يكفي لجمع الإلكترونات والبروتونات مع بعضها لتكوين نيوترونات في عملية معاكسة لانحلال أشعة بيتا:

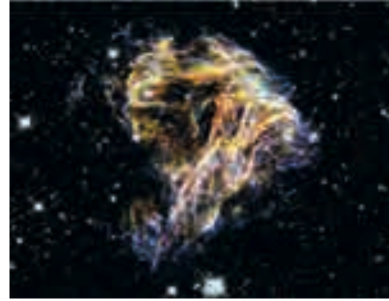


$$e^- + p \rightarrow n + \nu.$$

وعندما ينهار القلب تحت طاقة الجاذبيّة الهائلة، فإنّ الكتلة الضخمة تصبح نواة هائلة مصنوعة بشكل كامل من النيوترونات. ويبقى حجم النّجم إلى حدٍّ ما محدّدًا بمبدأ باولي للاستثناء، والذي يطبق هنا على النيوترونات (*neutron degeneracy*) ويبدأ النّجم بالانكماش سريعا باتجاه تكوين **نجم نيوترونيّ** هائل الكثافة. إنّ انكماش القلب يعني نقصانًا كبيرًا في الطاقة الكامنة الناجمة عن الجاذبيّة، وهذه الطاقة يجب أن تتحرر بصورة ما. وفي الواقع، اقترح في ثلاثينيّات القرن الماضي أنّ انهيار القلب النهائيّ للنجم النيوترونيّ يصاحبه انفجار هائل تستطيع طاقته الضخمة فعليًّا تشكيل عناصر الجدول الدوري كلّها، وإطلاق الغلاف الخارجي للنجم بالكامل بعيدًا (الشّكل 33 − 9)، ونشر مكوناته في الفراغ الموجود بين النّجوم. ويعتقد أنّ مثل هذه الانفجارات هي السّبب في بعض انفجارات السوبرنوفا الملحوظة، حيث يشير وجود العناصر الثقيلة على الأرض وفي نظامنا الشّمسيّ إلى أنّ نظامنا الشّمسيّ قد تشكّل من هذه الانفجارات.

النّجوم النيوترونيّة

انفجار السوبرنوفا



الشّكل 33 − 9 هذه الخيوط المتوهجة التي رصدت بتلسكوب هبل الفضائي، هي بقايا انفجار سوبرنوفا الذي وصل ضوؤه الأرض بعد آلاف السنوات. وفي الداخل، هنالك نجم نيوترونيّ دوّار يُسَمّى النابض (**Pulsar**).

إنّ قلب النّجم النيوترونيّ ينكمش إلى النقطة التي تكون عندها النيوترونات كلّها قريبة من بعضها كقربها في النواة. أي أنّ كثافة النّجم النيوترونيّ أكبر 10^{14} مرة من الأجسام الصلبة والسائلة العادية على سطح الأرض. إنّ كوبًا مملوءًا من مادة النّجم النيوترونيّ قد يزن ملايين الأطنان. كما أنّ النّجم النيوترونيّ الذي كتلته أكبر بمرة ونصف من شمسنا له قطر يساوي 20 km فقط.

إذا كانت الكتلة النهائية للنجم النيوترونيّ أقلّ من حوالي مرتين أو ثلاث من كتلة الشّمس، فإنّه، بعد تطوراته المتتالية، يعتقد أنه سيصبح مشابهًا للأقزام البيض. ولكن إذا كانت الكتلة أكبر من ذلك، فإنّ النّجم سينهار تحت تأثير الجاذبيّة، متجاوزًا حتى مبدأ باولي للاستثناء الخاص بالنيوترونات. وتصبح الجاذبيّة هنا قوية جدًّا؛ لدرجة أنّ الضّوء لا يستطيع الإفلات منها — يسحب الضّوء للداخل بسبب قوة الجاذبيّة، وبالتالي فإنّه لا يظهر أيّ إشعاع من مثل هذا النّجم، ولذلك، لا يمكن رؤيته — ويعود راجعًا. وأيّ جسم يمر به أو ينحرف باتجاهه نتيجة مجال جاذبيته بحيث يكون قريبًا جدًّا منه، فإنّه سوف يبتلعه، ولن يفلت منه. وهذا ما يُسَمّى **بالثّقب الأسود**.

النوفا والسوبرنوفا

النوفا (والتي تعني الجديد باللغة اللاتينية) هي نجوم باهتة يزداد بريقها فجأة بمعامل يزيد على 10^4 في شهر أو شهرين قبل أفولها. ويعتقد أنّ النوفا قزمٌ أبيض باهت، يسحب كتلته من مرافق قريب منه (يعملان معًا كنظام ثنائيّ) كما هو موضح في (الشّكل 33 – 10). تندمج الكتلة الممتصة من الهيدروجين لتكوين الهيليوم بمعدل عالٍ في أسابيع قليلة. معظم النوفا (إن لم يكن كلّها) متكررة؛ أي أنّها تكرر سطوعها في سنوات لاحقة. كما أنّ **السوبرنوفا** أيضًا انفجار مختصر ولحظي، ولكنه يبثّ طاقة أكبر ملايين المرات من النوفا، ويصل سطوعها إلى 10^{10} مرة من سطوع شمسنا. أضف إلى أنّ ذروة البريق يمكن أن تساوي تلك التي لكامل المجرة التي تكون فيها، والتي تدوم بضعة أيام فقط. وهي تبقى ساطعة، ولكنها تتلاشى تدريجيًّا خلال بضعة شهور. زدْ على ذلك أنّ الكثير من **السوبرنوفا** تتشكل بانهيار قلب النّجوم النيوترونية كما هو موضح سابقًا.

إنّ النوع Ia من **السوبرنوفا** تبدو بشكل مختلف، ويبدو لها كلّها السّطوع نفسه. ويعتقد بأنّها عبارة عن نجوم ثنائية أحدها قزم أبيض يسحب كتلته من مرافقه كما هو في حالة النوفا. (الشّكل 33 – 10). تصبح الكتلة أكبر فأكبر باستمرار امتصاص الكتلة، وبوصول الكتلة الكلية إلى حدّ غاندراسيخر وهو 1.4 من كتلة الشّمس، يبدأ النّجم بالانهيار ثم ينفجر مشكلا سوبرنوفا.



الشّكل 33 – 10 نموذج افتراضي للنوفا والنوع (Ia) من السوبرنوفا يرينا كيف أنّ القزم الأبيض يستطيع سحب الكتلة من مرافقه الطبيعيّ.

سوبرنوفا Ia

3-33 قياس المسافات

كيف نستطيع قياس المسافات الفلكيّة؟

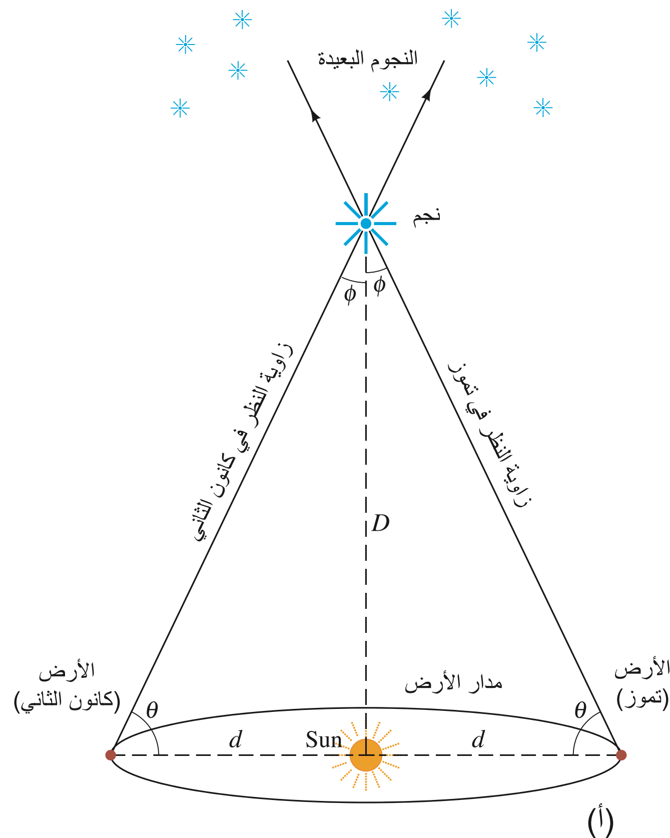
سنتناول الآن المسافات الهائلة للأجسام في الكون. ولكن كيف نستطيع قياس هذه المسافات؟ إحدى الطرق الأساسية تستعمل طريقة هندسية بسيطة لقياس ما يُسَمّى **اختلاف المطلع (Parallax)** لنجوم أبعد بسبب حركة الأرض حول الشّمس. وكما هو موضح في (الشّكل 33 – 11). فإنّ الزاوية البصرية للنجم مع مستوى مدار الأرض (الزاوية θ) يمكن قياسها في أزمنة مختلفة من السنة. ولأنّنا نعرف المسافة d بين الأرض والشّمس، يمكننا تنظيم المثلثات القائمة الموضحة في (الشّكل 33 – 11)، وبالتالي تحديد المسافة D * التي تمثل بعد النّجم.

* هذه هي الطريقة المستخدمة لتحديد ارتفاع الجبال بواسطة المثلثات. انظر (المثال 1-9)

الشّكل 33 – 11 (أ) تحديد بعد النّجم بطريقة اختلاف المطلع. المثلثات التخيلية هي مثلثات قائمة، و ϕ زاوية صغيرة جدًا. (ب) يرينا منظرا للسماء، موقع الظهور لنجم قريب بالنسبة للنجوم الأبعد في وقتين مختلفين (كانون الثاني وتموز). زاوية الظهور في كانون الثاني تضع النّجم أبعد إلى اليمين بالنسبة لموقع النّجم، ولكن في تموز، يكون النّجم أبعد إلى اليسار (الدائرة المخططة ترينا الموقع في كانون الثاني).







مثال 6-33 تقدير بُعْدِ النّجم بطريقة اختلاف المطلع

احسب المسافة D التي يبعدها النّجم إذا كانت الزاوية θ في (الشّكل 33 – 11) قد قيست لتساوي $89.99994°$.

النّهج: من هندسة المثلثات، يكون $\tan\phi = d/D$ في (الشّكل 33 – 1). البُعدُ بين الشّمس والأرض هو $d = 1.5 \times 10^8\ \text{km}$

الحلّ:
$$\phi = 90° - 89.99994° = 0.00006°$$
$$1.0 \times 10^{-6}\ \text{radians}$$

ولأنّ ϕ صغيرة جدًّا، فإنّنا نستطيع استخدام $\tan\phi \approx \phi$. لذا، فإنّ بُعْدَ النّجم D يساوي

$$D = \frac{d}{\tan\phi} \approx \frac{d}{\phi} = \frac{1.5 \times 10^8\ \text{km}}{1.0 \times 10^{-6}\ \text{rad}} = 1.5 \times 10^{14}\ \text{km},$$

أو 15 سنة ضوئية

تحدد المسافات النّجميّة دائمًا بدلالة زاوية المطلع التي تعطى بثواني القوس؛ حيث إنّ ثانية واحدة ($1''$) تساوي $\frac{1}{60}$ من الدقيقة القوسيّة والتي تساوي $\frac{1}{60}$ من الدرجة ولذلك فإن $1'' = \frac{1}{3600}$ من الدرجة. تعطى المسافة بوحدة تُسَمّى **الفرسخ الفلكي (pc)** والتي تعني الزاوية القوسيّة بوحدة الثواني، وتساوي $1/\phi$ حيث ϕ بالثواني. في (المثال 33 – 6) $\phi = (6 \times 10^{-5})°(3600) = 0.22''$، وبالتالي نستطيع القول إنّ النّجم على مسافة $1/0.22'' = 4.5\ \text{pc}$. ومن السهل الاستنتاج أنّ الفرسخ (pc) يعطى كما يلي:

فرسخ (وحدة)

$$1\ \text{pc} = 3.26\ \text{ly}$$
$$= (3.26\ \text{ly})(9.46 \times 10^{15}\ \text{m/ly}) = 3.08 \times 10^{16}\ \text{m}.$$

ويمكن استخدام طريقة اختلاف المطلع لقياس مسافة النّجوم التي تبعد 100 سنة ضوئية (≈ 30 parsecs) من الأرض. ومن مدار القمر الصناعي، يمكن قياس مسافات تكبر 5 – 10 مرات عن هذه المسافة. أمّا أبعد من ذلك، فإنّ زاوية المطلع تصبح صغيرة جدًّا بحيث يصعب قياسها. في حين يجب استخدام تقنيات مناسبة أكثر لمسافات أكبر. نستطيع مقارنة البريق الظاهريّ لمجرتين، واستخدام قانون التربيع العكسيّ (حيث تقلّ شدة الضّوء مع مربع المسافة) لتقدير المسافة النسبية لكليهما. ولا نتوقع أنّ تكون هذه الطريقة دقيقة جدًّا؛ لأنّنا لا نتوقع أنّ المجرات جميعها لها السّطوع نفسه. وقد يكون هنالك تقدير أفضل يفترض أنّ النّجوم السّاطعة في المجرات جميعها (أو المجرات السّاطعة في العناقيد المجريّة) متشابهة، ولها السطوع المطلق نفسه. وهكذا فإنّ بريقها الظاهري يعدّ مقياسًا لبعدها.

وهنالك طريقة أخرى نستخدم فيها مخطط $H-R$. يمكن قياس درجة حرارة سطح النّجم (من طيفه)، وبتحديد مكانه ($\pm 20\%$) على مخطط $H-R$ على اعتبار أنّ النّجم من نجوم التسلسل الأساسيّ يمكن تقدير سطوعه من المحور العموديّ (الشّكل 33 – 6). إنّ بريقه الظاهري و (المعادلة 33 – 1) يعطياننا المسافة التقريبية. انظر (المثال 33 – 5).

متغيرات cepheid

كما أنّ تقديرا أفضل يأتي من مقارنة النّجوم المتغيرة، مثل النّجوم المتغيرة القيفاوية، والتي يتناسب معدل سطوعها الحقيقيّ (الذي يتغير مع الزمن) مع زمنها الدوري. إنّ المسافات الأكبر يمكن تقديرها من مقارنة البريق الظاهري للنوع Ia من السوبرنوفات (SNIa) المختلفة. إنّ النوع Ia من السوبرنوفات له المصدر نفسه (تنهار إلى نجوم نيوترونية عند 1.4 من الكتلة الشّمسية كما شرحنا في الصفحة السابقة والشّكل 33 – 10)، وانفجارها اللحظي يبثّ ضوءًا يتوقع أن يكون له السّطوع الكليّ نفسه، وفي بعض الأحيان تكون شبيهة بالشموع المعيارية.

SNIa كوحدات قياس عيارية

إضف إلى ذلك أنّ هناك طريقة أخرى مهمة لقياس المسافات من خلال الانزياح نحو الأحمر لخط طيف العناصر أو المركبات. يرتبط الانزياح نحو الأحمر بتمدد الكون كما سنناقشه في (البند 33 – 5). وتعدّ هذه الطريقة مفيدة في حالة الأجسام التي تبعد عنا مسافة 10^7 إلى 10^8 سنة ضوئيّة. وكلما نظرنا بعيدًا أكثر، فإنّ القياس سيكون أقلّ مصداقية وغير دقيق.

4-33 نظريّة النسبيّة العامّة: الجاذبيّة وتحدّب الفضاء

الشكل 33 – 12 مصعد يسقط سقوطًا حرًّا. الكتاب السّاقط يحوم تحت يدي صاحبه، (ب) بعد لحظات قليلة من (a).





لقد رأينا أنّ قوة الجاذبيّة تقوم بدور مهم في العمليات التي تظهر في النّجوم. كما أنّ الجاذبيّة مهمة أيضًا في نشوء الكون كوحدة متكاملة. إنّ الأسباب التي تجعل قواعد قوة الجاذبيّة مسيطرة في الكون وليست واحدة من أنواع القوى الأربع الأخرى في الطبيعة هي أنّها: (1) ذات مدى واسع. (2) قوة تجاذب دائما. إنّ القوى النّوويّة القوية والضعيفة تؤثر في مسافات قصيرة جدًّا فقط، في حدود حجم النواة، أي أنّها لا تؤثر في مدى المسافات الفلكيّة (تؤثر بين الأنّوية والجسيمات النّوويّة في النّجوم لإنتاج تفاعل نووي). أما القوة الكهرومغناطيسية كالجاذبيّة، فتؤثر في مسافات كبيرة، ولكنها يمكن أن تكون قوى تجاذب أو تنافر، أي أنّ الكون لا يبدو كأنه يحوي مساحات واسعة من الشحنات الكهربائية الكلية، ولا تظهر هنا قوة محصلة كبيرة. إنّ الجاذبيّة تؤثر كقوة تجاذب بين الكتل جميعها. ويكون هنالك تراكم كبير للكتلة وهي من النوع نفسه (ليس كالشحنات الكهربائية لها إشارة (-) وإشارة (+)). بالإضافة إلى ذلك فإنّ قوة الجاذبيّة كما وصفها نيوتن في قانون الجذب العام ترينا تناقضات في الأبعاد الكونية. لقد طوّر آينشتاين في نظريته النسبية العامة نظرية الجاذبيّة التي تشكّل الآن أساسيات الدّيناميكا الكونيّة.

لقد استنتج آينشتاين في نظرية النسبية الخاصة (الفصل 26)، عدم وجود طريقة يستطيع من خلالها المشاهد أن يحدد كون محور إسناد معين ساكنًا أو متحركًا بسرعة ثابتة، وعلى خط مستقيم. لذا، فإنّ قوانين الفيزياء يجب أن تكون نفسها في محاور الإسناد القصوريّة المختلفة. ولكن ماذا عن الحالة الأكثر عمومية للحركة، والتي تكون فيها محاور الإسناد متسارعة؟ أخذ آينشتاين بالحسبان المحاور المتسارعة في **نظريته النسبية العامة**، وكذلك في تطوير نظرية الجاذبيّة. وتعدّ رياضيات نظرية النسبية العامة معقدة نوعًا ما، ولذلك، سيكون نقاشنا وصفيًّا فقط.

سنبدأ **بمبدأ** آينشتاين **للتكافؤ** الذي ينصّ على:

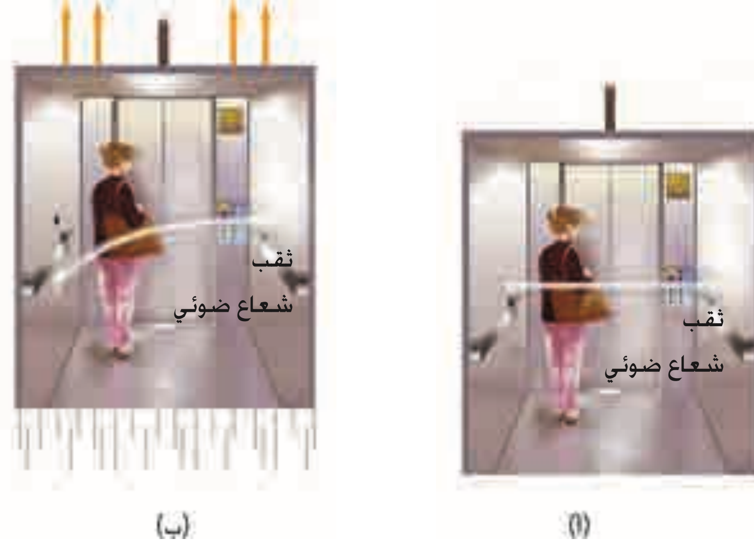
مبدأ التساوي

لا نستطيع عمل تجربة نستطيع التمييز من خلالها بين مجال الجاذبيّة المنتظم وأيّ تسارع منتظم مكافئ له.

إذا أحسّ أشخاص بأنهم يتسارعون (كما في مركبة تسير على منعطف حاد)، فإنّهم لا يستطيعون الإثبات (بأيّ تجربة) بأنهم في الحقيقة لا يتأثرون من سحب مجال الجاذبية الأرضية. وعلى العكس من ذلك، يجب عليهم التفكير بأنّهم يسحبون من قبل الجاذبيّة عندما يشعرون في الحقيقة من تسارع قصوريّ، ولا يستطيعون عمل شيء مع الجاذبيّة.

وكتجربة ذهنية، افرض أن شخصًا ما داخل مصعد يسقط سقوطًا حرًّا بالقرب من سطح الأرض. إذا كانت مشاهدتنا هي إسقاط كتاب من بين يدي هذا الشخص، فماذا سيحدث؟ ستقوم الجاذبيّة بسحبه للأسفل باتجاه الأرض، ولكن في الوقت نفسه، فإنّ الشخص والمصعد يتحركان نحو الأسفل بالتسارع نفسه ($g = 9.8\ m/s^2$) . لذا، فإنّ الكتاب سيحوم تحت يدي الشخص (الشّكل 33 – 12). إنّ التأثير سيكون نفسه تمامًا في حال كون محور الإسناد هذا ساكنًا ولا يتأثر بأيّ قوة. ومن جهة أخرى، إذا كان المصعد في الفضاء الخارجي حيث يكون مجال الجاذبيّة مساويًا للصفر، فإنّ الكتاب الساقط سيطفو كما هو الحال في (الشّكل 33 – 12). وبعد ذلك، إذا كان المصعد الموجود في الفضاء الخارجي يتسارع للأعلى بمعدل $9.8\ m/s^2$، فإنّ الكتاب كما يرى من مشاهدنا سيسقط على أرضية المصعد بتسارع مقداره $9.8\ m/s^2$ كما هو الوضع عند سقوطه سقوطًا حرًّا في مجال الجاذبيّة الأرضية على سطح الأرض. واستنادا إلى مبدأ التكافؤ، فإنّ المشاهد لا يستطيع تحديد سبب سقوط الكتاب: هل هو من تسارع المصعد للأعلى، أم بسبب مجال الجاذبيّة الذي يؤثر للأسفل عندما يكون المصعد ساكنًا؛ فالوضعان السابقان متكافئان تمامًا.

يرتبط مبدأ التكافؤ بمفهوم عدم وجود نوعين من الكتلة. إنّ قانون نيوتن الثاني، $F = ma$ يستخدم **الكتلة القصورية**. ونستطيع القول إنّ الكتلة القصورية تمثل مقاومة الجسم لأيّ نوع من أنواع القوى. أمّا النوع الثاني من الكتلة فهو **كتلة الجذب**؛ فعندما يقوم جسم بجذب جسم آخر بقوة جذب معينة (تعطى من قانون الجذب العام لنيوتن $F = Gm_1m_2/r^2$، الفصل 5)، فإنّ مقدار هذه القوة يتناسب مع حاصل ضرب كتلتي الجذب لكلا الجسمين. وهذا يشبه تمامًا قوة الجذب الكهربائية بين جسمين، والتي تتناسب مع حاصل ضرب شحنتيهما.



الشّكل 33 – 13 (أ) الحزمة الضوئية تذهب بمسار مستقيم في مصعد غير متسارع. (ب) الحزمة الضّوئية تنحني في المصعد الذي يتسارع للأعلى.

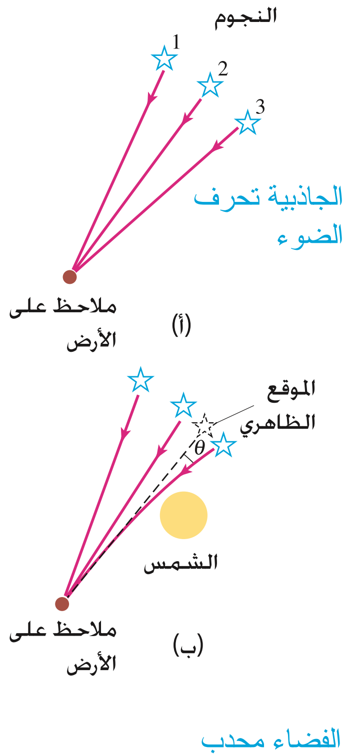
إنّ الشحنة الكهربائية لجسم لا تتناسب مع كتلته القصورية. إذن، فلماذا يجب أن نتوقّع بأنّ كتلة الجذب للأجسام (يمكن إذا أردت أن تسمّيها شحنة الجاذبيّة) تتناسب مع كتلتها القصوريّة؟ إنّ كلّ ما نملكه هو اعتبارهما متساويتين. لماذا؟ بسبب عدم وجود تجربة - بدقة عالية – تستطيع أن تبيّن أيّ فرق مَقيس بين الكتلة القصورية وكتلة الجذب. وهذه طريقة أخرى لتعريف مبدأ التكافؤ: كتلة الجذب تكافئ كتلة القصور.

يمكن استخدام مبدأ التكافؤ ليرينا أنّ الضّوء يُتَوقع أن ينحرف بسبب قوة الجاذبيّة للأجسام ذات الكتل الكبيرة. خذ التجربة الذهنية التالية التي يكون فيها المصعد في الفضاء تخيليًّا لا يتأثر بأيّ جاذبية. إذا مرت حزمة ضوئية من خلال ثقب في أحد جوانب المصعد، فإنّ هذه الحزمة تذهب بمسار مستقيم خلاله، وتعمل بقعة على الجانب المقابل للثقب تمامًا إذا كان المصعد ساكنًا (الشّكل 33 – 13 أ). أمّا إذا كان المصعد يتسارع نحو الأعلى كما في (الشّكل 33 – 13 ب)، فإنّ الحزمة الضوئية تستمر بالسير بمسار مستقيم خلال المصعد في محور إسناد ساكن. في تسارع المصعد للأعلى، من جهة أخرى، يلاحظ أنّ الحزمة تنحني تجاه الأسفل. لماذا؟ لأنّه خلال الزمن الذي تحتاج إليه الحزمة الضوئية للسير من أحد جوانب المصعد إلى آخر، فإنّ المصعد يتحرك نحو الأعلى بسرعة متزايدة. ونلاحظ بعد ذلك أنه اعتمادًا على مبدأ التكافؤ، فإنّ محور الإسناد الذي يتسارع صوب الأعلى يكافئ مجال الجاذبيّة الذي يتجه نحو الأسفل. وهنا نستطيع أن نتخيل المسار المائل للضوء في (الشّكل 33 – 13 ب)، وكأنه ينتج من تأثير مجال الجاذبيّة. لذلك، ومن مبدأ التكافؤ، فإنّنا نتوقع أنّ الجاذبيّة تؤثر بقوة في الحزمة الضوئية، وتعمل على انحنائها عن السير بخط مستقيم!

إنّ تأثر الضّوء بالجاذبيّة هو استنتاج مهمٌّ لنظرية آينشتاين العامة في النسبية. ويمكن اختبار هذا الاستنتاج. كمية الانحراف للحزمة الضوئية عن الخط المستقيم يجب أن تكون صغيرة حتى عند مرورها بالقرب من الكتل الكبيرة. (مثلًا، الضّوء الذي يمر بالقرب من الأرض، وبعد مروره $1\ km$، يُتوقع أن ينحرف مسافة تساوي $10^{-10}m$ تقريبًا، والتي تساوي قطر ذرة صغيرة غير مرئية). إنّ أكبر كتلة بالقرب منا هي الشّمس. وعليه، فإنّ البريق الهائل لها لا يغمر مرور الضّوء المستقيم بالقرب من حافتها. وقد ظهر كسوف ملائم في عام 1999، حيث سافر العلماء إلى شمال المحيط الأطلسي لمشاهدته، وقد التقطوا صورا للنجوم القريبة من الشّمس أظهرت انحرافًا عن مكانها موافقة لاستنتاج آينشتاين.

إذا تحركت الحزمة الضوئية بمسار مائل، كما نوقش سابقًا، فيمكن القول إنّ الفضاء بحدّ ذاته محدّب، وإنّ كتلة الجذب هي سبب هذا التّحدّب. وفي الواقع، فإنّ تحدّب الفضاء (أو الفضاء ذو الأبعاد الرباعية مع الزمن) يعدّ موضوعا رئيسًا لنظريّة النسبيّة العامّة لآينشتاين.

الشّكل 33 – 14 (أ) ثلاثة نجوم في السماء. (ب) إذا كان الضّوء الصادر عن أحد النجوم يمر بالقرب من الشّمس فإنّ جاذبيته تحرف الأشعة. وبالتالي، يبدو النّجم أعلى من مكانه الحقيقي.

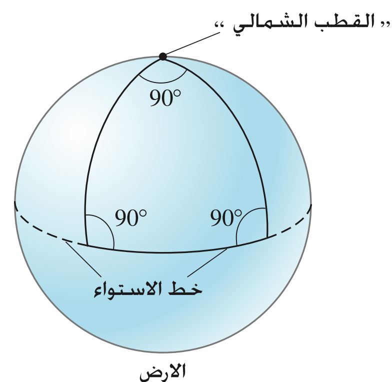


ماذا نعني **بالفضاء المحدّب** (*curved space*)؟ لفهم هذا؛ فإنّنا نسترجع أنّ الطرق العادية لتصوّر العالم هي من خلال الهندسة المستوية الإقليديّة، والتي يكون لدينا فيها الكثير من البديهيّات والنّظريات المسلّم بها، مثل: مجموع زوايا المثلث يساوي 180°.

أمّا الهندسة غير الإقليديّة التي تعنى بالفضاء المحدّب، فيمكن تخيلها أيضًا بواسطة الرياضيين. إنّ تخيّلَ الفضاء المنحني بثلاثة أبعاد صعبٌ للغاية، فما بالك بتخيل الفضاء بأربعة أبعاد، بإضافة الزّمن كبعد رابع. لذلك، دعنا نحاول فهم فكرة الفضاء المحدب باستخدام سطحين ثنائيّي الأبعاد.

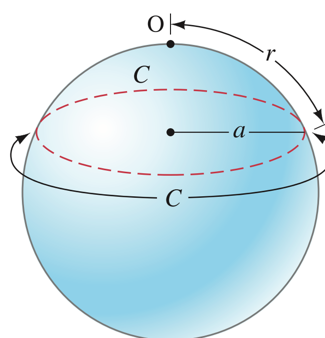
افرض على سبيل المثال سطحين ثنائيّي الأبعاد لكرة. من الواضح أنّ التحدب، (الشّكل 33 – 5)، يظهر لنا على الأقلّ من الخارج من عالمنا ثلاثيّ الأبعاد. ولكن كيف تستطيع مخلوقات افتراضية ثنائية الأبعاد تخيّل كون الفضاء ثنائي الأبعاد مستويًا أو محدبًا؟ إنّ إحدى الطرق تكون بقياس مجموع زوايا المثلث. إذا كان السّطح مستويًا، فسيكون مجموع الزوايا 180°، كما تعلمنا في الهندسة المستوية. ولكن إذا كان الفضاء محدّبًا، فسيتشكل بالضرورة لدينا مثلث كبير يكون مجموع الزوايا فيه ليس 180°. ولتشكيل مثلث على سطح منحنٍ، على كرة مثلا كما في (الشّكل 33 – 15)، يجب علينا استخدام ما يكافئ الخطّ المستقيم؛ أيْ أقصر مسافة بين نقطتين، والتي تسمّى **الجيوديسك**. يكون الجيوديسك على الكرة قوسًا من دائرة كاملة (القوس في المستوى يمر في مركز الدائرة) مثل خط الاستواء الأرضي وخطوط الطول الأرضية. خذ، على سبيل المثال، المثلث الكبير في (الشّكل 33 – 15)؛ ضلعا المثلث عبارة عن خطي طول يمران من القطب الشمالي إلى خط الاستواء، والضلع الثالث هو مقطع من خطّ الاستواء كما هو موضح في الشّكل. خطا الطول يصنعان زاوية مقدارها 90° مع خطّ الاستواء (انظر إلى الكرة الأرضيّة لرؤية ذلك بوضوح) كما أنّهما يصنعان زاوية مقدارها 90° مع بعضهما بعضًا عند القطب الشّمالي. مجموع هذه الزوايا يساوي $90^\circ + 90^\circ + 90^\circ = 270^\circ$. وبصورة واضحة، فإنّ هذا السّطح ليس فضاءً إقليديًّا. ومن جهة أخرى، لاحظ أنه إذا كان المثلث صغيرًا مقارنة بنصف قطر الكرة، فإنّ مجموع الزوايا سيصبح قريبًا من 180°. وبذلك يكون المثلث (وبالتالي الفضاء) مستويًا.

الجيوديسك (الخط الجيوديسيّ)

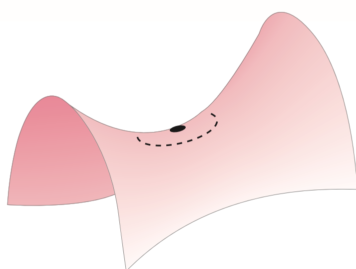


الشكل 33 – 15 مجموع زوايا المثلث في سطح ثنائي الأبعاد لا يساوي 180°.

وهنالك طريقة أخرى لاختبار انحناء الفضاء وهي بقياس نصف القطر r والمحيط C لدائرة كبيرة. في السّطح المستوي، يكون $C = 2\pi r$. ولكن في السّطح الكروي ثنائيّ الأبعاد، فإنّ C تكون أقلّ من $2\pi r$ كما يمكن ملاحظته في (الشّكل 33 – 16). إنّ التّناسب بين C، و r أقلّ من 2π. ويقال لمثل هذا السّطح بأنّه ذو انحناء موجب. إنّ محيط الدائرة للسّطح الموضح في (الشّكل 33 – 17) والذي يشبه سرج الفرس أكبر من $2\pi r$. ولهذا، فإنّ مجموع زوايا المثلث المرسوم عليه أقلّ من 180°؛ مثل هذا السطح له انحناء سالب.



الشّكل 33 – 16 على سطح كرويّ (عالم ثنائيّ الأبعاد) رسمت دائرة محيطها C حول نقطة O كمركز لها. نصف قطر الدائرة (وليس الكرة) هو المسافة r على سطح الكرة. (لاحظ أنه من نظرتنا ثلاثية الأبعاد يمكن القول بأنّ $C = 2\pi a$. ولأنّ $r > a$، فإنّ $2\pi r > C$).



الشّكل 33 - 17 مثال على سطح ثنائيّ الأبعاد ذي تحدب سالب.

انحناء الكون

والآن، ماذا عن الكون؟ في مقياس أكبر (ليس فقط بالقرب من الكتل الكبيرة) ماذا عن الانحناء الكلي للكون؟ ما انحناؤه؛ موجب، أم سالب؟ أم أنّه مستوٍ (دون انحناء)؟

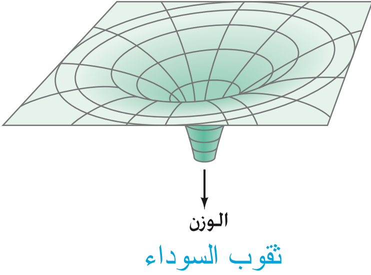
هل الكون مفتوح أم مغلق؟

إذا كان للكون انحناء موجب، فيجب أن يكون مغلقًا، أو محدودًا في الحجم. وهذا لا يعني أنّ النّجوم والمجرات تنتشر نحو الخارج إلى حدّ معيّن، ومن ثَمّ سيكون هناك فضاء فارغ. لا يوجد حدّ أو حافة في مثل هذا الكون. إذا تحرك جسيم بخط مستقيم باتجاه معيّن فإنّه سيعود إلى نقطة البداية؛ بالطبع بعد دهر من الزّمن.

ومن جهة أخرى، إذا كان انحناء الفضاء يساوي صفرًا أو سالبًا، فإنّ الكون يكون مفتوحًا وسيستمر كذلك إلى الأبد. ومن الممكن أن يكون الكون المفتوح لانهائيًّا، ولكن ليس بالضرورة اعتمادًا على الأبحاث المعاصرة.

في هذه الأيام، تشير الدلالات بقوة إلى أنّ الكون بمقياس أكبر قريب جدًّا من التسطح. وبالفعل، لأنّه كذلك، فهذا يحول دون معرفتنا هل الانحناء موجب قليلا أم سالب قليلا.

الثّقوب السوداء



ثقوب السوداء

الشّكل 33 – 18 صفيحة مطاط كنموذج لتحدب الفضاء الزمني بالمادة.

استنادًا إلى نظرية آينشتاين، فإنّ الفضاء الزمني ينحني بالقرب من الأجسام الكبيرة. يمكن تخيل الفضاء على أنه يشبه صفيحة مطاطية رقيقة. إذا عُلّق جسم ذو كتلة كبيرة بها، فإنّها تنحني كما في (الشّكل 33 – 18). إنّ الوزن هنا يشبه الكتلة الهائلة التي تسبب انحناء الفضاء. لذلك، فإنّنا لا نتكلم في نظرية آينشتاين * عن قوة الجاذبيّة التي تؤثر في الأجسام، وعوضًا عن ذلك، نقول إنّ الأجسام والأشعة الضوئية تتحرك بطريقتها لأنّ الفضاء الزمني منحنٍ. الجسم الساكن أو الذي يتحرك ببطء بالقرب من الكتلة الهائلة في (الشّكل 33 – 18) سيتبع الجِيوديسك (المكافئ للخط المستقيم في الهندسة المستوية) باتجاه ذلك الجسم.

إنّ الانحناء المبالغ فيه في الفضاء الزمني الموضح في (الشّكل 33 – 18) يمكن أن ينجم عن **ثقب أسود**. الثقب الأسود، كما رأينا في (البند 33 – 2)، كثيف جدًّا، لدرجة أنّ الضّوء لا يستطيع الإفلات منه. وحتى يصبح ثقبًا أسود، فإنّ الجسم ذا الكتلة M يجب أن يخضع **لانهيار جذبيّ** بحيث ينقبض تحت تأثير جاذبيته الذاتية ليصبح نصف قطره مساويًا لما يُسَمّى بنصف **قطر شوارزشيلد**:

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

الأفق اللحظيّ

حيث G هو ثابت الجذب العام، و c سرعة الضّوء.

يمثّل نصف قطر شوارزشيلد أيضًا الأفق اللحظي للثقب الأسود. و**الأفق اللحظي** يعني السطح الذي تحته لا يمكن لأيّ إشارة أن تتجاوزنا، وبالتالي يخبرنا عن اللحظات التي تحدث. وعندما ينهار النّجم باتجاه الثقب الأسود، فإنّ الضّوء الذي يَبْعَثُهُ يُسْحَبُ بشكل أقوى بسبب الجاذبيّة، ولكننا لا نزال نستطيع رؤيته. وعندما تمر المادة خلال الأفق اللحظيّ، فإنّ الضّوء المنبعث لا يستطيع الإفلات، ولكنه يسحب إلى الخلف بالجاذبيّة.

كلّ ما نستطيع معرفته عن الثقب الأسود هو كتلته، وزخمه الزاوي (قد نجد ثقوبًا سود دوّارة)، وشحنته الكهربائية. ولكننا لا نستطيع معرفة معلومات أخرى عنه كتركيبه، أو نوع المواد التي تشكله؛ بسبب عدم وجود معلومات تستطيع الإفلات منه.

هل نستطيع مشاهدة الثّقوب السّود؟ لا نستطيع رؤيتها؛ لأنّه لا يفلت منها أيّ ضوء وبالتالي ستبدو أجسامًا سودا في سماء سوداء، ولكنها تؤثر بقوة جذب في الأجسام المجاورة.

لقد اكتشف الثقب الأسود الذي يُعتقد بوجوده في مركز مجرتنا باختبار حركة المواد في المنطقة المجاورة له. وهناك طريقة أخرى هي اختبار النّجوم التي تبدو دوّارة كأنها أعضاء في نظام ثنائي (نجمان يدوران حول مركز كتلتيهما)، وأيضًا فإنّ النّجم المرافق يكون غير مرئيّ. إذا كان النّجم غير المرئيّ ثقبا أسود، فمن المتوقع أن يسحب المواد الغازية من مرافقه المرئيّ (كما في الشّكل 33 – 10). عندما تصل هذه المادة إلى الثقب الأسود، فإنّها تتسارع بشدة، وتبعث أشعة سينيّة (X-rays) لها خصائص معينة قبل غرقها في الأفق اللحظيّ. إنّ مثل هذه الأشعة السّينيّة، بالإضافة إلى معلومات وافية عن الكتلة الهائلة المحسوبة من الحركة الدورانيّة، يمكن أن توفر دليلا على وجود الثقب الأسود. وهناك واحد من عدة مرشحات لتكوين ثقب أسود موجود في نظام النّجم الثنائي في كوكبة الدجاجة X-1.

*كتب الكسندر بوب *(1688 - 1749)* نقشًا على ضريح نيوتن يقول: الطبيعة، وقوانين الطبيعة مخبأ في الليل.

قال الله، ليكن نيوتن، فكان الضوء

وأضاف السيد جون سكوير *(1884 - 1958)* الذي لم يكن معجبًا بأفكار آينشتاين العظيمة قائلا:

لم تدم طويلا؛ فقد صاح الشيطان، هو!

ليكن اينشتاين! فاستعاد الوضع الراهن

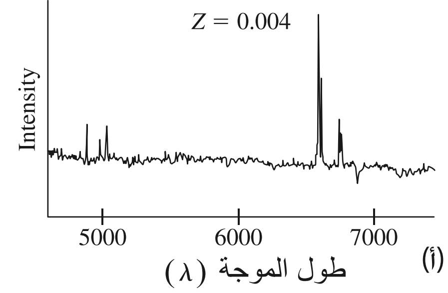
5-33 الكون المتمدد الانزياح نحو الأحمر وقانون هَبِل

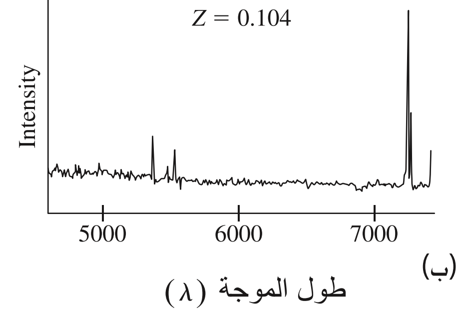
ناقشنا في (البند 33 – 2) كيفية تطوّر النّجوم من الولادة وحتى الممات مثل الأقزام البيض، والنّجوم النيوترونية، والثّقوب السوداء. ولكن ماذا عن الكون ككل؟ هل هو ساكن أم متغير؟ واحدة من أهم النتائج العلمية في القرن العشرين هي أنّ المجرات البعيدة تنطلق بعيدًا عنا، وأنّه كلّما كانت أبعد كانت أسرع في الابتعاد. كيف توصل الفلكيون إلى هذه الفكرة الفلكيّة؟ وماذا تعني بالنسبة إلى تاريخ الكون الماضي ومستقبله. هذا ما سنبحثه فيما تبقى من الكتاب.

اقترحت فكرة تمدد الكون أولا بواسطة إدوين هَبِل عام 1929. وقد اعتمدت هذه الفكرة على المسافات التي تمّ قياسها للمجرات (البند 33 – 3) وتحديد سرعتها من انزياح دوبلر لخط الطيف للضوء الصادر عنها (الشّكل 33 – 19). وفي الفصل 12، رأينا كيفية تغيّر كلّ من تردد موجة الصوت وطولها إذا كان المصدر يتحرك باتّجاه المشاهد أو بعيدًا عنه. إذا تحرك المصدر باتّجاهنا، فإنّ التردد يصبح أعلى، في حين يصبح الطول الموجيّ أقصر. أمّا إذا تحرك المصدر بعيدًا عنا، فإنّ التردد يصبح أقلّ، في حين يصبح الطول الموجيّ أطول. وتظهر **ظاهرة دوبلر** أيضًا في الضّوء، ولكن الطول الموجي أو التردد الجديدين يعطيان بصيغة تختلف قليلًا عمّا هي عليه في حالة الصوت*. واستنادًا إلى نظرية النسبية الخاصة، فإنّ انزياح دوبلر يعطى كما يلي:

[المصدر والمشاهد يتحركان بعيدًا عن بعضهما]

$$\lambda = \lambda_0\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \qquad \textbf{(3 - 33)}$$





الشّكل 33 – 19

الذرات والجزيئات تبعث الضّوء وتمتصّه بترددات محددة تعتمد على المسافات بين مستويات الطاقة لها كما رأينا في (الفصول 27، و 28، و 29).

(أ) الطيف الضوئي المنبعث من مجرة بطيئة الحركة حيث، $Z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$

(ب) الطيف الصادر عن مجرة تتحرك بعيدًا عنا بسرعة أكبر. لاحظ انزياح خطوط الطيف لأطوال موجية أكبر (انزياح نحو الأحمر).

حيث λ_0 الطول الموجي المنبعث كما يشاهد من محور إسناد سكوني بالنسبة للمصدر، و λ الطول الموجي المقيس من محور إسناد يتحرك بسرعة v بعيدًا عن المصدر على خط النظر. (في حالة الحركة النسبية بعيدًا عن بعضهما بعضا تكون $v > 0$ في هذه المعادلة). عندما يبعث المصدر ضوءًا بطول موجيّ محدد، وعندما يتحرك هذا المصدر بعيدًا عنا، فإنّ الطّول الموجيّ يبدو أطول بالنسبة لنا؛ يُزاح لون الضّوء (إذا كان مرئيًا) باتّجاه النهاية الحمراء للطيف المرئيّ. وتعرف هذه الظاهرة **بالانزياح نحو الأحمر**. (إذا كان المصدر يتحرك باتّجاهنا، فإنّ لون الضّوء يُزاح نحو الأزرق أو الطول الموجي الأقصر). إنّ مقدار الانزياح نحو الأحمر يحدد بمعامل الانزياح نحو الأحمر (z) والذي يعرّف كما يلي:

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \qquad \textbf{(4 - 33)}$$

ونستطيع دمج (المعادلتين 33 – 3، و 33 – 4) للحصول على[2]

$$z = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \qquad \textbf{(5 – 33 أ)}$$

وللسرعات التي ليست قريبة جدًّا من سرعة الضّوء، من السهل إثبات أنّ z (المسألة 29) تتناسب مع سرعة المصدر في حالة ابتعاده عنا (كما هو الحال بالنسبة للصوت).

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c} \qquad [v \ll c] \qquad \textbf{(5 – 33 ب)}$$

وعندما يكون الانزياح نحو الأحمر ليس صغيرًا، فالتقريب في هذه الحالة غير وارد في (المعادلة 33 – 5 ب). التلسكوبات الحديثة لاحظت بطريقة منتظمة مجرّات لها $z \approx 5$.

* بالنسبة للضوء، لا يكون هناك وسط ناقل، ولا نميّز بين حركة كلّ من المصدر والمشاهد (النّظريّة النسبيّة الخاصة) كما هو الحال في حالة الصوت الذي يحتاج إلى مصدر مادي ينتقل فيه (الفصل 12).

** (المعادلة 33 – 5 أ) ليست دقيقة تمامًا؛ لأنّ من المؤكّد أنّ الانزياح نحو الأحمر هو بسبب تمدد الفضاء، وليس بسبب الحركة فيه. (ظاهرة دوبلر، معادلة 3 – 33).

المثال 33-7 إذا أعطيت z فما هي قيمة v؟

ما سرعة مجرة إذا كان معامل انزياحها نحو الأحمر هو $z = 5$؟

النّهج: نجري تقريبًا باستخدام صيغة دوبلر. (المعادلة 33 – 5 أ) (لاحظ الملاحظة ** في الصفحة السابقة).

الحلّ: نضيف 1 إلى كلا الجانبين في (المعادلة 33 – 5 أ)

$$z + 1 = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

وبتعويض $z = 5$، وبتربيع كلا الطرفين في هذه المعادلة، ثم استعمال المعادلة لإيجاد قيمة v

$$6^2 = \frac{1 + v/c}{1 - v/c}$$

$$36\left(1 - \frac{v}{c}\right) = 1 + \frac{v}{c}$$

وبتجميع الحدّ v/c في جهة واحدة، نحصل على

$$35 = 37\frac{v}{c}$$

وأخيرا، فإنّ

$$v = \frac{35}{37}c = 0.95c$$

ملحوظة: تبيّن هذه السرعة كيفية تمدّد الكون (وكذلك الفضاء) بسرعة كبيرة عند موقع هذه المجرة كما يشاهد من الأرض.

التمرين جـ: إذا كانت $v = 0.70c$ فما مقدار z؟

في أطياف بعض النّجوم الموجودة في مجرّات أخرى، تشاهد خطوط الطيف مشابهة لخطوط الطيف المنبعثة من بعض الذّرات المحددة (انظر البند 27 – 11). لقد لاحظ هَبِلُ أنّ الخطوط في أطياف المجرات البعيدة تكون مزاحة نحو الأحمر بشكل عام، ويبدو أنّ مقدار هذا الانزياح وكأنه يتناسب مع بُعد المجرات عنّا تقريبًا. أي أنّ السرعة لمجرة تتحرك بعيدًا عنا تتناسب مع بُعْدِ المجرة عنا d:

قانون هبل

$$v = Hd. \qquad \textbf{(6-33)}$$

وهذا هو **قانون هَبِلْ**، أحد أكبر الأفكار الفلكيّة الأساسية. يُسَمّى الثابتُ H **مُعاملَ هَبِل**. إنّ قانون هَبِل لا يعمل بشكل جيد في حالة المجرات القريبة – في الواقع، المجرات القريبة ترينا انزياحًا نحو الأزرق (تتحرك باتّجاهنا) والتي لا تمثل إلا حركة عشوائية موضعية. وفي المجرات الأبعد، فإنّ سرعة التراجع (قانون هَبِل) تكون أكبر بكثير منها في حالة الحركة العشوائية، وبالتالي تكون سائدة. وهنا نقول إنه **انزياح فلكيّ نحو الأحمر**، ونستطيع أن نعزي ظهوره إلى تمدّد الفضاء نفسه. وفي الواقع، يمكن التّفكير بأنّ الطول الموجيّ الأصلي المنبعث λ_0 قد تمدّد، وأصبح أطول مع تمدّد الفضاء حوله. وحتى وقت قريب، فإنّ مقدار H فيه خطأ بحدود 20%، ويعتقد بأنّه بين 50 و 80 km/s/Mpc. ولكن القياسات الحالية (2003) وضعت قيمة أكثر دقة تساوي

متغيرات هبل

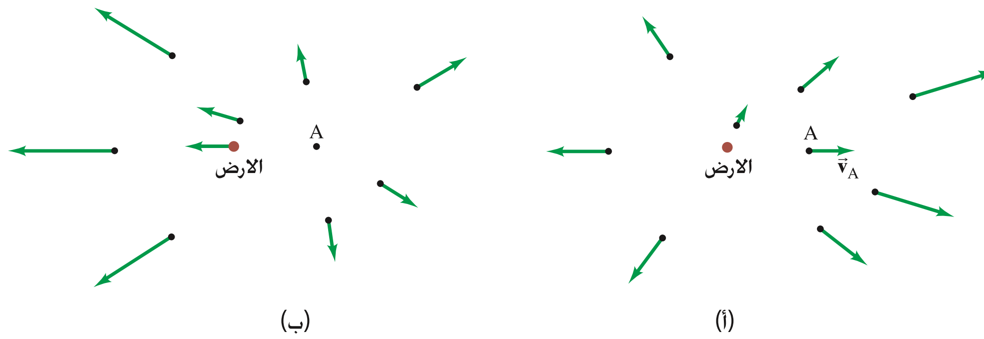
$$H = 71\ \text{km/s/Mpc}$$

(أي 71 km/s لكلّ ميغا فرسخ من المسافة).الخطأ في هذه القيمة نحو 5%،أو ± 4 km/s/Mpc. إذا استخدمنا السنوات الضوئية للمسافات، فإنّ $H = 22$ km/s لكلّ مليون سنة ضوئية من المسافات:

$$H \approx 22\ \text{km/s/Mly}$$

وبخطأ يساوي ± 1 km/s/Mly تقريبًا.

ماذا يعني أنّ المجرات البعيدة تتحرك جميعها مبتعدة عنّا، وبسرعة أكبر كلّما كانت أبعد عنّا؟ يظهر أنّنا سنقترح نوعًا من التمدد الانفجاريّ الذي بدأ على مسافة زمنية في الماضي. وللوهلة الأولى، يبدو أنّنا في منتصف هذا الحدث، ولكننا لسنا كذلك. ويبدو التمدد نفسه من أيّ نقطة في الكون. وكي تفهم السبب؛ انظر إلى (الشّكل 33 – 20). في (الشّكل 33 – 20 أ)، لدينا نظرة من الأرض (أو من مجرتنا). سرعة المجرات المحيطة والتي تمثل بالأسهم تشير بعيدًا عنّا، وهذه الأسهم أطول للمجرات الأبعد عنا. والآن، ماذا لو كنّا على المجرة A في (الشّكل 33 – 20 أ)؟ من الأرض، تبدو المجرة A متحركة إلى اليمين وبسرعة نسميها $\vec{\mathbf{v}}_A$، وتمثل بسهم يشير نحو اليمين. وإذا كنا على المجرة A، فإنّ الأرض تبدو وكأنّها تتحرك إلى اليسار بسرعة $\vec{\mathbf{v}}_A$-. ولإيجاد السرع للمجرات الأخرى بالنسبة إلى A؛ نقوم بالجمع الاتجاهي للمتجه $\vec{\mathbf{v}}_A$ للمتجهات الأخرى جميعها (الممثلة بالأسهم) في (الشّكل 33 – 20 أ)، وهذا يعطينا (الشّكل 33 – 20 ب)، حيث نرى بوضوح أنّ الكون يتمدّد بعيدًا عن المجرة A كما هو متوقع. إضافة إلى أنّ سُرعات المجرات المبتعدة عن A تتناسب مع بعدها عنها.



الشكل 20 – 33 يبدو توسع الكون من أي نقطة التوسع نفسه

إنّ تمدد الكون يبدو نفسه من أيّ نقطة فيه. لذا، فإنّ تمدد الكون يمكن أن يحدد كما يلي: تبتعد المجرات جميعها عن بعضها بمعدّل يساوي $71\ km/s$ تقريبًا لكلّ ميغا فرسخ من المسافة بينها. تعدّ إشكالات هذه الفكرة صعبة ومتشعبة؛ ولهذا سنناقشها بعجالة.

المبدأ الكونيّ

هناك افتراض أساسي في علم الكونيّات بمقياس كبير، وهو أنّ الكون نفسه يبدو للمشاهدين من أماكن مختلفة وفي الزمن نفسه. وبكلمات أخرى، فإنّ الكون موحد الخصائص (*isotropic*) (يبدو نفسه في الاتجاهات جميعها) ومتجانس (*homogeneous*) (يبدو نفسه إذا كنا في مكان آخر، مثلا على مجرة أخرى). ويُسَمّى هذا الافتراضُ **المبدأَ الكونيَّ**. في مقياس موضعي، في نظامنا الشّمسي أو داخل مجرتنا، من الواضح أنه لا ينطبق (السماء تبدو مختلفة بالنظر إليها من أماكن مختلفة). ولكن يعتقد بأنه ينطبق إذا نظرنا إليه بمقياس كبير بما يكفي، حيث إنّ متوسط كثافة المجرات والعناقيد المجريّة تبدو نفسها في عدة مناطق في السماء. وهذا يبدو منطبقًا على مسافة تزيد على نحو 200 Mpc (700 Mly). إنّ تمدّد الكون (الشّكل 33 – 20) منسجم مع المبدأ الكونيّ، والأشعة الكونية الميكروويفية المنتظمة الموجودة بالقرب منا تعزز هذا الافتراض. يقترح تمدد الكون كما وصفه هَبِلُ بقوة أنّ المجرات كانت في الماضي أقرب لبعضها مما هي عليه الآن. وهذا هو في الواقع أساس نظرية الانفجار العظيم لأصل الكون، والتي تصوّر الكون بأنه يتمدد تمددًا غير ليّن. يبدأ من بداية منضغطة هائلة الحرارة. سنناقش نظرية الانفجار العظيم بالتفصيل، ولكن سنناقش أولا عمر الكون.

إنّ إحدى الطرائق لتقدير عمر الكون هي باستخدام معامل هَبِلْ: حيث $H \approx 22$ km/s لكلّ 10^6 سنة ضوئية. فإنّ الزمن اللازم للمجرات للوصول إلى وضعها الانفصالي الحالي سيكون تقريبًا (ابتداءً من $v = d/t$ وباستخدام قانون هبل. المعادلة 33 – 6):

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d}{Hd} = \frac{1}{H} \approx \frac{(10^6\,\text{ly})(0.95 \times 10^{13}\,\text{km/ly})}{(22\,\text{km/s})(3.16 \times 10^7\,\text{s/yr})} \approx 13.7 \times 10^9\,\text{yr},$$

أو 13.6 بليون سنة. يسمّى عمر الكون المحسوب بهذه الطريقة زمن التمدد المميز أو "عمر هبل"، وهذا حساب تقريبيّ على اعتبار أنّ معدل تمدد الكون ثابت (والذي يعتقد هذه الأيام بأنه غير صحيح). وهناك حسابات حديثة (2003) أعطت عمر الكون على أنّه 13.7×10^9 yr، وهذه القيمة تعطي اتفاقًا كبيرًا مع حسابات عمر هبل التقريبيّ.

عمر الكون

* نموذج ثبات الحالة

قبل أن نناقش نظرية الانفجار العظيم بتفاصيلها. سنشير إلى أحد بدائله وهو **نموذج ثبات الحالة**، الذي يفترض أنّ الكون قديم أبد الدهر. ويبدو الآن كما لو كان في أيّ وقت مضى (هذا يفترض الانتظام في كلّ من الزمان والمكان ويُسَمّى المبدأ الكوني التام) واستنادا إلى نموذج ثبات الحالة. فإنّه لا توجد تغيرات في مقياس كبير قد حدثت في الكون كوحدة واحدة. أي لا يوجد انفجار عظيم. لتأكيد هذه النظرة مقابل ابتعاد المجرات عن بعضها. فإنّ قانون حفظ الكتلة – الطاقة يجب انتهاكه. أي أنّ المادة يجب أن تخلق باستمرار لتأكيد اقتراح الانتظام. إنّ معدل خلق الطاقة المطلوب صغير جدًّا؛ نيوكليون واحد في المتر المكعب كلّ 10^9 سنة تقريبًا.

لقد زوّد نموذج ثبات الحالة نموذج الانفجار العظيم بمنافسة مناسبة في منتصف القرن العشرين. ولكن اكتشاف أشعة الميكروويف الكونية الخلفية (البند اللاحق). بالإضافة إلى التمدد الملحوظ في الكون جعل نموذج الانفجار العظيم مقبولا عالميًّا تقريبًا.

6-33 الانفجار العظيم وخلفية المايكروويف الكونية

يقترح تمدّد الكون أنّ الأجسام العادية الموجودة في الكون كانت في وقت ما قريبة من بعضها أكثر مما هي عليه الآن. وهذا هو الأساس بالنسبة للفكرة التي تقول إنّ الكون بدأ قبل نحو 13.7 مليار عام. ثم تمدد من حالة تتصف بكثافة ودرجة حرارة مرتفعة جدًّا تُسَمّى **الانفجار العظيم**.

الانفجار العظيم

إنّ الانفجار العظيم ليس انفجارًا؛ لأنّ الانفجار ينثر قطعًا إلى الفراغ المحيط. ولكن بدلا من ذلك. فإنّ الانفجار العظيم كان بداية لتمدد الكون نفسه. إنّ حجم الكون الذي نشاهده كان صغيرًا جدًّا في البداية. ثم تمدد منذ ذلك الحين. ويجب ألا نعتقد أنّ الحجم الأصلي الدقيق لمادة كثافتها كبيرة جدًّا على أنه كتلة مركزة في وسط فضاء كبير يحيط بها. إنّ هذا الحجم الأصلي الدقيق والكثيف هو الكون: الكون كاملا. ولم يكن هناك أيّ شيء آخر. وعندما نقول إنّ الكون كان في زمن ما أصغر مما هو عليه الآن. فإنّنا نقصد أنّ متوسط المسافة بين المجرات (أو الأجسام الأخرى) كان أقلّ. لذلك. فإنّ حجم الكون هو الذي ازداد منذ الانفجار العظيم.

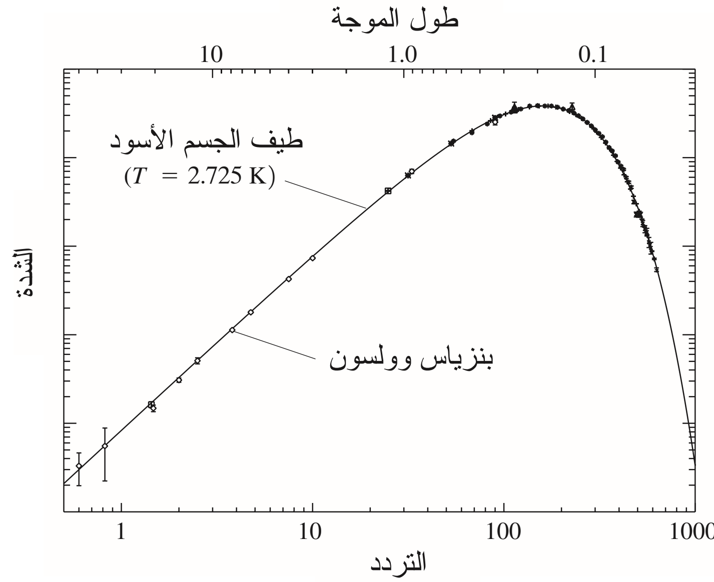
إنّ المدلول الرئيس الذي يؤيد الانفجار العظيم هو **الإشعاعات الخلفية للميكروويف الكونية** (CMB) التي اكتشفت كما يلي:

الشّكل 33 – 21: روبرت ولسون (يسارًا) وأرنو بنزياس وخلفهم الهوائي البوقي الذي صمماه.



في عام 1964 كان العالِمان أرنو بنزياس وروبرت ولسون يختبران مشكلة ما افتراضه التشويش الخلفي " أو السّكونيّ" في التلسكوب اللاسلكي الخاص بهما (جهاز هوائي كبير للكشف عن موجات المذياع من السماء. الشّكل 33 – 21). وفي النهاية. اقتنعا أنّ هذا التشويش حقيقيّ. وأنّه قادم من خارج المجرة. لقد قاما بإجراء أقيسة دقيقة عند الطول الموجي $\lambda = 7.35$ cm الذي يقع ضمن منطقة المايكروويف من الطيف الكهرومغناطيسي (الشّكل 22 – 8). لقد وجدا أنّ شدة هذه الإشعاعات لا تتغير في الأصل من النهار إلى الليل. أو أيّ وقت في السنة. كما أنها لا تعتمد على الاتجاه. إنها تأتي من الاتجاهات جميعها في الكون. وبالشدة نفسها. وبدقة أفضل من 1%. ويمكن الاستنتاج فقط أنّ هذه الإشعاعات تأتي من الكون كلّه.

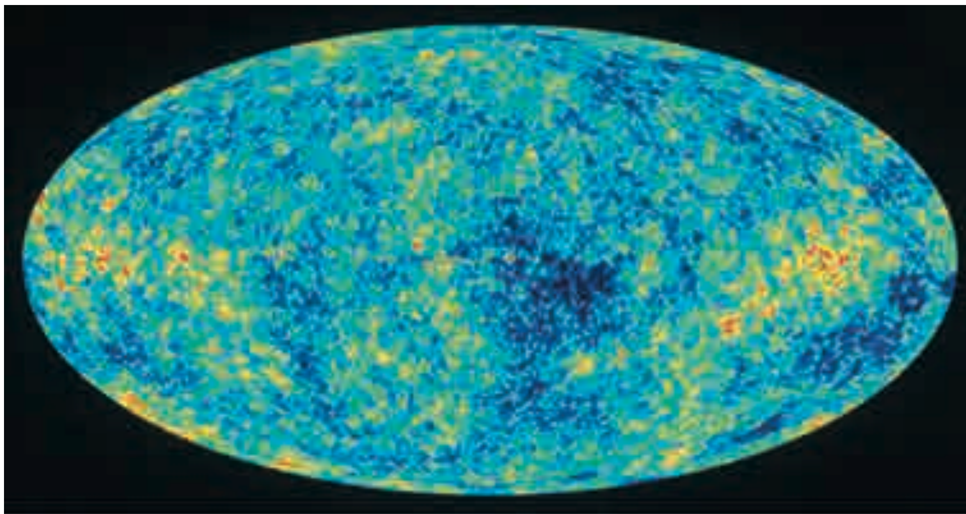
الخلفية الكونية لشعاع المايكرويف 2.73-k



الشّكل 33 – 22 يبين طيف الإشعاعات الخلفية الكونية للمايكروويف، يرينا منحنى الجسم الأسود والأقيسة التجريبية بما فيها تلك التي حصل عليها بنزياس وولسون. (الشكل لكلّ من سموت وسكوت. تمثل الخطوط الرأسية عدم اليقين في الأقيسة التجريبية.)

إنّ شدة إشعاعات خلفية المايكروويف الكونية هذه كما تم قياسها عند $\lambda = 7.35\ \text{cm}$ والتي تقابل إشعاعات الجسم الأسود (انظر البند 27 – 2) عند درجة الحرارة 3K تقريبًا. وعند قياس إشعاعات عند أطوال موجية أخرى. وجد أنّ شدتها تقع على منحنى الجسم الأسود كما هو مبين في (الشّكل 33 – 22). لتقابل درجة الحرارة 2.725 K تبدأ قوة جديدة. لقد كان الانتظام المميز لإشعاعات خلفية المايكروويف الكونية متوافقًا مع المبدأ الكوني. ولكن شعر علماء الفيزياء النّظريّة بضرورة إلى وجود تباين قليل في الخصائص. أو نوع من عدم التجانس في CMB التي كونت البذور التي بدأت حولها تشكّل مجرة ما. وبالفعل. فقد وجد أنّ مناطق صغيرة ذات كثافة ودرجة حرارة مرتفعة قليلًا يمكن أن تتكون قد انكمشت تحت تأثير الجاذبيّة لتشكّل نجومًا ومجرات. وقد اكتشفت هذه المناطق الصغيرة ذات الخصائص المتباينة أولًا بواسطة COBE (مسبار الكشف عن الخلفية الإشعاعية الكونية) وهو قمر صناعيّ استخدم في هذه التجربة عام 1992. ثم بواسطة تجارب لاحقة أكثر تفصيلا وصلت ذروتها في عام 2003 عن طريق النتائج التي تم الحصول عليها من WMAP (مسبار تباين خصائص مايكروويف ويلكنسون). انظر (الشّكل 33 – 23). حيث بين WMAP أن درجة حرارة CMB هي في حدود 2.725 ±0.002 K وقد كانت درجة حرارة CMB دليلا قويًّا يؤيد الانفجار العظيم. كما أنها زودتنا بمعلومات حول الظروف السائدة في الكون المبكر جدًّا. وفي الحقيقة. فقد قام جورج جامو ومساعدوه بإجراء حسابات في أواخر أربعينيّات القرن الماضي تدلّ على أنّ نشأة الكون من الانفجار العظيم يجب أن تؤدي إلى إنتاج مثل هذه الإشعاعات الخلفية للمايكروويف الكونية.

أهمية *CMB*: الانفجار العظيم



الشّكل 33 – 23 إشعاعات خلفية المايكروويف الكونية خلال السماء، تمثّل الدلالاتُ اللونية الاختلافاتِ في درجة الحرارة عن المتوسط 2.725 K: يتراوح التدريج اللوني بين +200 μK (اللون الأحمر) و −200 μK (اللون الأزرق الغامق). وتمثّل البقع الساخنة والباردة (والاختلافات في الكثافة أيضًا). تم الحصول على هذه النتائج من القمر الصّناعيّ WMAP في عام 2003؛ يصل التحليل الزاوي إلى 0.2°. النسخة الأكبر من WMAP الموجودة في بداية هذا الفصل تم عملها عند حزمة تردد معينة، وتشتمل على مجرتنا التي تظهر في مقدمة الصورة (الشريط الأحمر)، ولكنها أزيلت من الصورة الحالية.

وكي نفهم السبب؛ دعنا نتأمّل في طبيعة الانفجار العظيم. في البداية، كانت درجة الحرارة مرتفعة جدًّا إلى الحدّ الذي لا يمكن أن تكون فيه أيّ ذرات في المراحل المبكرة للكون. وبدلًا من ذلك، كان الكون يحتوي على إشعاعات (فوتونات)، وبلازما من إلكترونات مشحونة، وجسيمات أولية أخرى فقط. كان الكون معتمًا؛ أي أنّ الفوتونات محصورة بحيث تنتقل مسافة قصيرة قبل أن تتبعثر مرةً أخرى بشكل أساسي عن طريق الإلكترونات. وبالفعل، فإنّ تفاصيل الإشعاعات الخلفية للمايكروويف الكونية هي دليل قويّ على أنّ المادة والإشعاعات كانا في وقت ما في حالة اتزان عند درجة حرارة مرتفعة جدًّا. وكلما تمدد الكون، فإنّ الطاقة تنتشر على حجم يزداد بشكل كبير ممّا يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة. وبعد 380,000 سنة فقط عندما انخفضت درجة الحرارة إلى 3000K تقريبا، تمكنت الأنوية والإلكترونات من الاتحاد مع بعضها لتشكيل الذرّات. ومع اختفاء الإلكترونات الحرة نتيجة اتحادها مع الأنوية لتشكيل الذرات، أصبحت الإشعاعات؛ أي أنّها أصبحت غير مقترنة بالمادة. ثم أصبح الكون شفافًا لأنّ الفوتونات الآن حرة، وتنتقل تقريبًا دون إعاقة بخطّ مستقيم خلال الكون.

الفوتونات منفصلة

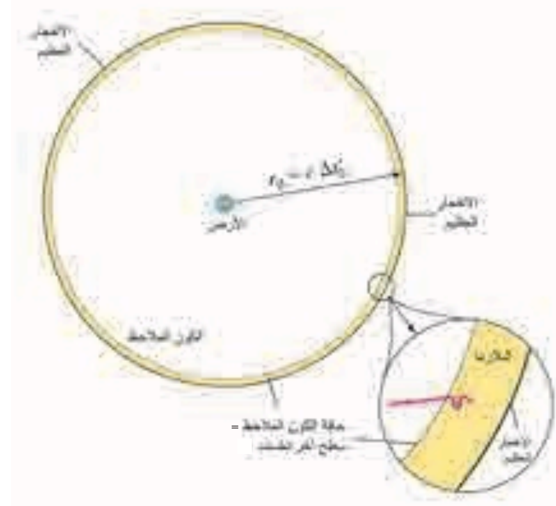
كلما تمدد الكون، فإنّ الأطوال الموجية للإشعاعات تطول أيضًا (يمكنك التفكير في الموجات الواقفة، البند 11 – 13)، أي تحدث إزاحة حمراء نحو الأطوال الموجية الأطول التي تقابل درجة حرارة منخفضة (تذكر قانون فين $1_p T =$ ثابت، البند 27 – 2)، حتى تصل إلى الإشعاعات الخلفية التي نشاهدها في الوقت الحاضر عند درجة الحرارة $2.7\ K$.

* العودة إلى الماضي نحو الانفجار العظيم؛ الزّمن الماضي

يبين (الشّكل 33 – 24) الأرض كنقطة مراقبة، عند النظر في الاتجاهات جميعها إلى الماضي نحو الانفجار العظيم والفترة الزمنية الموجزة (تمتد إلى 380,000 سنة) عندما كانت الإشعاعات محصورة في البلازما المبكرة (الشريط الأصفر). يُسَمّى الزّمنُ الذي يستغرقه الضّوء حتى يصل إلينا من حادثة ما (مثلا قبل 5×10^9 سنة) **الزمنَ الماضي**. ويبين الجزء المكبر من (الشّكل 33 – 24) تبعثرًا مكررًا لفوتون داخل البلازما ثم يخرج منها في خطّ مستقيم. إنّ الاتجاه الذي ننظر إليه ليس مهما؛ لأنّ مراقبتنا للكون المبكر جدًّا تصطدم دائمًا بهذا الحاجز من البلازما؛ يمكننا أن نرى فقط وبحد أقصى سطحه الذي يُسَمّى '' سطح آخر تبعثر'' ولكن ليس ما في داخله.

الزمن الماضي

لقد حدث للأطوال الموجية التي تصدر من هناك إزاحةٌ حمراء بمقدار $z \approx 1000$. أما الزمن $\Delta t'$ في (الشّكل 33 – 24) فيمثل الزّمن الماضي (ليس الزّمن الحقيقيّ الذي يشير إلى المستقبل).

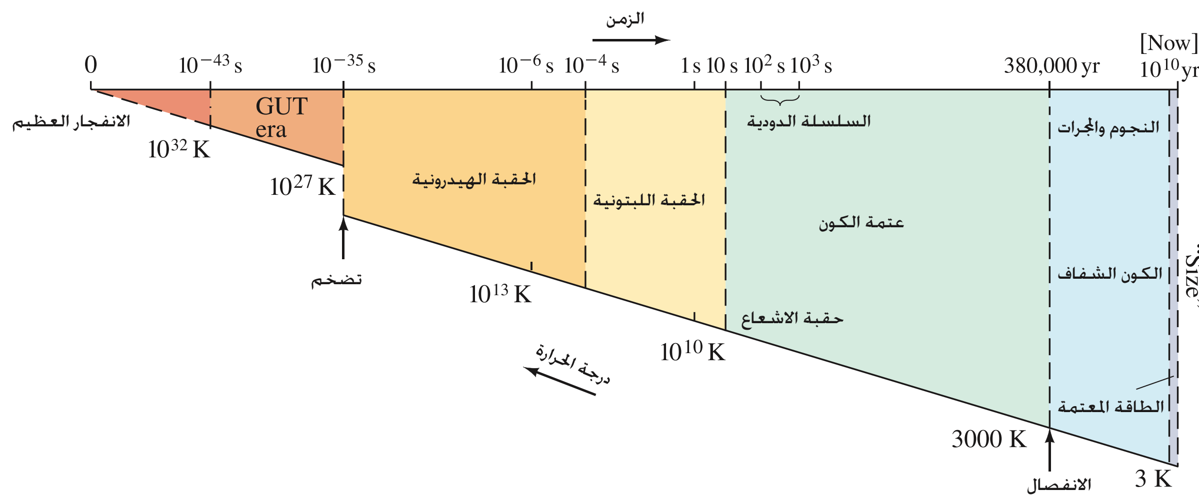


الشّكل 33 – 24 عندما ننظر إلى السماء من سطح الأرض، فإننا ننظر إلى الزمن الماضي. كما يستطيع أي ملاحظ في هذا الكون رؤية الشيء نفسه.
تستطيع رؤية سطح أخر تشتت حدث والذي يمثل CMB. وهذا الانفجار يمثل ال 380,000 التي قضيت من عمر الكون عندما كان مقيما: حيث يظهر البروتون يتشتت عدة مرات ينفصل عند 380,000 سنة من الانفجار العظيم، حيث يصبح حراً للانتقال في خط مستقيم. ولولا لم يكن هذا البروتون متجه نحونا عندما "تحر" فإن الكثير من البروتونات غيره قد فصلت. لم يتم اظهار المجرات ولكنها ستكون متكاتفه حول الأرض. الشكل الفضاء
ملاحظة: الشكل ليس طريقة طبيعية. حيث تظهر الخرائط جزءآ من العالم كما يمكن رؤيته عند أي لحظة في الزمن. ولكن يظهر هذا الشكل الفضاء على صورة خريطة ولكن لييست جميع النقاط ضمن الزمن نفسه. حيث يحتاج الضوء القادم من نقطة تبعد مسافة (r) من الأرض إلى زمن مقداره $\Delta t' = r\ c$ للوصول إلى الأإض وبالتالي يظهر حدثًا حدث قبل ذلك الزمن $\Delta t' = r/c$ في الماضي وهذا ما نقصد بالنضر إلى الوراء. حدث الانفجار العظيم عند مليون سنة ضوئية $\Delta t'_0 = 13.7\ \mathrm{Gyr}$

7-33 النموذج الكوني؛ التاريخ المبكر للكون

لقد طوّرت نظرية مقنعة عن أصل الكون ونشأته في آخر عقد أو عقدين. وتُسَمّى الآن **النموذج الكونيّ المعياريّ**، أو نموذج الانسجام أحيانًا. يستند جزء من هذه النّظريّة إلى التّطورات النّظريّة والتّجريبية الحديثة في فيزياء الجسيمات الأولية. وبالفعل، فإنّ علم الكونيّات وفيزياء الجسيمات الأولية يثري كلّ منهما الآخر إلى حدٍّ مذهل.

دعنا نعود إلى الأوقات المبكرة – قريبًا قدر الإمكان من الانفجار العظيم – ونتتبع مسار النموذج المعياري للحوادث عندما تمدّد الكون، ثم برد بعد الانفجار العظيم. بداية، سنتحدث عن فترات زمنية صغيرة بالإضافة إلى درجات حرارة مرتفعة جدًّا، بعيدًا وراء أيّ شيء في الكون الحالي. يبين (الشّكل 33 – 25) تمثيلًا بيانيًّا مسطّحًا لهذه الحوادث. وربما يستفاد منه لاحقًا.



الشّكل 33 – 25: تمثيل بيانيّ مسطح لتطورات الكون بعد الانفجار العظيم وفق علم الكونيّات الحديث. [المقياس الزّمنيّ في الأغلب لوغاريتميّ (كلّ معامل 10 في الزمن له المعاملة نفسها)، ما عدا عند البداية (ليس هناك $t = 0$ على المقياس اللوغاريتميّ)، وبعد $t = 10^{-35}$ مباشرة (لتوفير متسع). الارتفاع العمودي عبارة عن فكرة تقريبية لحجم الكون، يقترح بشكل أساسيّ تمدد الكون.]

التّاريخ

علم الكونيات الحديث " السيناريو" لتاريخ الكون بعد الانفجار العظيم القوى الأربعة جميعها موحدة.

نبدأ عند زمن صغير جدًّا يمثل جزءًا من الثانية 10^{-43}s بعد حدوث الانفجار العظيم. هذا الزمن قصير جدًّا، ولا يمكن تخيله. ولهذا، فإنّ التنبؤات يمكن أن تكون نوعًا من التخمين فقط. سابقًا، لم نتمكن من قول أيّ شيء لأنّنا ما زلنا لا نعرف تأثيرات النّظريّة الكمية في الجاذبيّة، وهي ضرورية في حالة الكثافات ودرجات الحرارة المرتفعة جدًّا. يعتقد بأنه قبل 10^{-35}s ربما قريبًا 10^{-43}s. كانت القوى الأربع في الطبيعة موحدة: كانت هناك قوة واحدة فقط. إنّ درجة الحرارة في هذه الظروف يجب أن تكون في حدود 10^{32}K. وهي ما تجعل الجسيمات تتحرك في الاتجاهات جميعها بمتوسط طاقة حركية تساوي 10^{19} GeV (انظر إلى معادلة 13 – 8).

القوة الاربعة جميعها مجتمعة

$$\text{KE} \approx kT \approx \frac{(1.4 \times 10^{-23}\,\text{J/K})(10^{32}\,\text{K})}{1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}} \approx 10^{28}\,\text{eV} = 10^{19}\,\text{GeV}$$

(لاحظ أنّ العامل $\frac{3}{2}$ في المعادلة 13 – 8. يهمل عادة عند إجراء حسابات لمثل رتبة هذا المقدار.) عند

انكسار التماثل (تكاثف الجاذبية)

$t = 10^{-43}$ s يعتقد أنّ نوعًا من التحول الطّوري قد حدث، وفي خلاله انفصلت قوة الجاذبيّة كقوة مستقلة. هذا التحول الطّوري والتحولات الطّورية المتعاقبة تشابه ذاك الذي يحدث للماء عندما يبرد من غاز ثم يتكاثف إلى سائل، ومن ثمّ يتحول إلى جليد بزيادة تبريده*. لقد انهار تماثل القوى الأربع، في حين بقيت القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية موحدة، وأنّ الكون دخل في الحقبة الموحدة الكبرى (انظر إلى الفصل 32).

* ربّما من المضحك ملاحظة أنّ قصتنا هنا عن الأصول تشبه حسابات قديمة تشير إلى " فراغ". " أرض قاحلة لم تتشكل". " هاوية" " فصلت المياه" (ربما تحول طوري؟). لم تتم الإشارة إلى الظهور المفاجئ للضوء.

الانتفاخ

لم يكن هناك فرق بين الكواركات والليبتونات، ولم تكن أعداد البريون والليبتون محفوظة. وبعد ذلك بفترة قصيرة، عندما تمدّد الكون بشكل ملحوظ، وانخفضت درجة الحرارة لتصل إلى نحو 10^{27}K، كان هناك تحوّل طوريّ آخر، وانفصلت القوة القوية عند 10^{-35}s تقريبًا بعد الانفجار العظيم. والآن، أصبح الكون مليئًا بسحاب كثيف من الليبتونات والكواركات. كانت الكواركات في البداية حرّة، ولكنها بدأت بتشكيل جسيمات طبيعية سريعًا؛ النيوكليونات، وهادرونات أخرى، وجسيماتها المضادة. وهكذا، و **حصر الكواركات** مع حصر الكواركات دخل الكون **حقبة الهادرون**.
وفي ذاك الزمن، عندما كان عمر الكون في حدود 10^{-35}s فقط، ربما حدث شيء غريب وفقًا لعلماء الفيزياء النّظريّة. اقترحت هذه الفكرة العبقرية في حدود عام 1980 حيث أشارت إلى أنّ الكون قد تمدد أُسّيًّا بشكل لا يصدق، وازداد حجمه بعامل 10^{40} أو 10^{50} خلال جزء دقيق جدًّا من الثانية، ربما يصل إلى 10^{-34}s. إنّ فائدة **سيناريو الانتفاخ** هذا، هو أنه يقدم حلا للمشاكل الرئيسة في النماذج المبكرة للانفجار العظيم، كتفسير سبب استواء الكون، بالإضافة إلى التوازن الحراري الذي يعطي CMB* منتظم تقريبًا. ويعدّ الانتفاخُ الآن ميزةً مقبولة لنظرية الانفجار العظيم.

وبعد فترة الانتفاخ القصيرة جدًّا، استقر الكون عائدًا إلى تمدده الطبيعي. ولقد أصبح الكون الآن عبارة عن سحابة كثيفة من الليبتونات والهادرونات. ويعتقد أنّ هذه السحابة الكثيفة خليط كبير من الجسيمات والجسيمات المضادة، بالإضافة إلى الفوتونات – جميعها متساوية تقريبًا في العدد – تتصادم مع بعضها بشكل متكرر، وتتبادل الطاقة.

إختفاء غالبية الهادرونات

وبحلول الوقت الذي أصبح عنده عمر الكون نحو 10^{-6}s كانت درجة حرارته قد انخفضت إلى 10^{13}K تقريبا، وهي التي تقابل متوسط الطاقة الحركية 1 GeV، واختفت الغالبية العظمى من الهادرونات. لمعرفة سبب ذلك؛ دعنا نركّز على الهادرونات المألوفة؛ النيوكليونات وجسيماتها المضادة. عندما كان متوسط الطاقة الحركية لجسيمات أعلى نوعًا ما من 1 GeV، كانت النيوترونات والبروتونات وجسيماتها المضادة تنشأ بشكل مستمر من طاقات تصادمات تشتمل على فوتونات وجسيمات أخرى، مثل:

$$\text{فوتونات} \rightarrow P + \overline{P}$$

$$\rightarrow n + \overline{n}$$

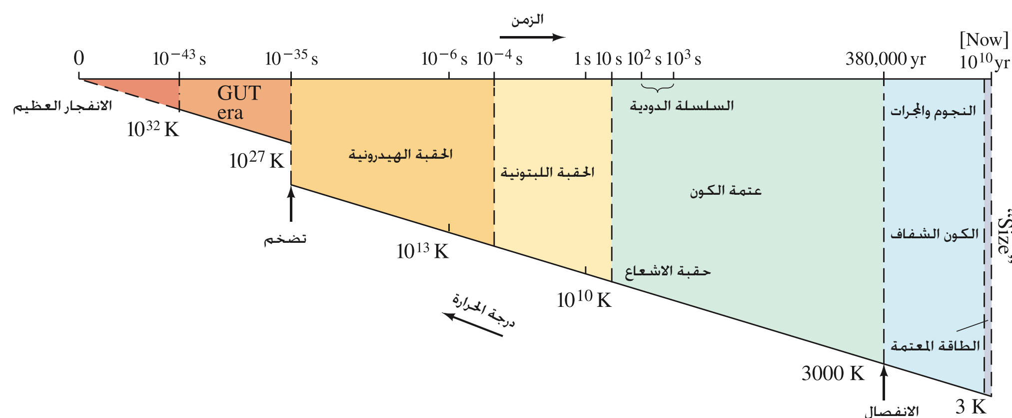
ولكنّه يحدث بسرعة، الجسيمات والجسيمات المضادة تفنى، فعلى سبيل المثال:

$$p + \overline{p} \rightarrow \text{فوتونات أو ليبتونات}$$

لماذا توجد مادة الآن؟

ولهذا، فإنّ عمليات خلق النيوكليونات وفنائها كانت متوازنة. لقد كانت أعداد النيوكليونات والنيوكليونات المضادة كبيرة – تقريبًا الأعداد نفسها التي كانت للإلكترونات، والبوزترونات، والفوتونات. ولكن عندما تمدد الكون وبرد، وانخفض متوسط الطاقة الحركية للجسيمات إلى أقلّ من 1 GeV وهو الحد الأدنى للطاقة الذي يحتاج إليه تصادم مثالي لخلق نيوكليونات ونيوكليونات مضادة (حوالي 940 MeV لكلّ منها) - فإنّ عملية خلق النيوكليونات لا يمكن أن تستمر. أما عملية الفناء، فيمكن أن تستمر على أيّ حال، حيث تلغي النيوكليونات المضادة النيوكليونات حتى تنتهي النيوكليونات كلّها تقريبًا. ولكن ليس نهائيا تمامًا. ولتفسير عالمنا الحالي الذي يشمل بشكل أساسي مادة (نيوكليونات وإلكترونات) وكمية قليلة من الجسيمات المضادة؛ يجب أن نفترض تشكّل فائض من الكواركات أكثر من الكواركات المضادة في وقت مبكر من عمر الكون، ربما نحو 10^{-35}s بعد الانفجار العظيم.

* كيف يفسر الانتفاخ استواء الكون؟ يمكن أن يفهم هذا عن طريق التفكير في كرة؛ دعنا نفترض الكرة التي في (الشّكل 33 – 15) والتي يظهر انحناء سطحها؛ فإذا ازداد حجمها بشكل كبير، فإنّ سطحها يبدو في الأساس مستويًا بالنسبة لمشاهد عليها. يفسر الانتفاخ أيضًا سبب الانتظام القويّ لـ CMB. دون الانتفاخ، كان الكون الدقيق عند اللحظة 10^{-35}s ما زال كبيرًا بالنسبة لأجزائه كلها حتى تكون متماسكة كي تصل إلى درجة الحرارة نفسها (لا يمكن أن تنتقل المعلومات بسرعة أكبر من سرعة الضّوء c). افرض أنّ قطر الكون كان 1cm تقريبا عند اللحظة 10^{-36}s وفقًا للنظرية الأصلية للانفجار العظيم. عند تلك اللحظة، يقطع الضّوء مسافة $d = ct = (3 \times 10^{8}\ m/s)(10^{-36}/s) \approx 10^{-27}\ m$، وهي مسافة صغيرة بالنسبة لكون قطره 1cm ليكون في حال تواصل بين أجزائه. ولكن إذا كان الكون أصغر بنحو 10^{40}، و 10^{50} مرة، فيمكن عندها أن يكون متماسكًا ومتوازنًا حراريًّا حتى ينجم عنه CMB منتظم تقريبًا كما نشاهده. لذلك، فإنّ الانتفاخ يسمح للكون المبكر جدًّا قبل الانتفاخ ليكون صغيرًا جدًّا بحيث تكون أجزاؤه جميعها متوازنة حراريًّا، في حين يكون كبيرا جدًّا بعد الانتفاخ وصولا إلى الكون الحاضر.



الشّكل 33 - 25 (مكرر)
تمثيل بيانيّ مسطّح للتطورات التي حدثت للكون بعد الانفجار العظيم وفقًا لعلم الكونيّات الحديث.

وقد أدّى ذلك إلى وجود فائض قليل من النيوكليونات على النيوكليونات المضادة. وهذه النيوكليونات المتبقية أو الفائضة هي التي نتكوّن منها حاليًّا. لقد كان الفائض في النيوكليونات على النيوكليونات المضادة حوالي جزء من كلّ 10^9. وفي وقت مبكر خلال حقبة الهادرون، كان عدد النيوكليونات مساويًا تقريبًا لعدد الفوتونات. وبعد نهايتها، فإنّ النيوكليونات الفائضة تمثّل فقط نيوكليونا واحدًا لكلّ 10^9 فوتون. وقد استمرت هذه النسبة حتى وقتنا الحاضر. عند اللحظة 10^{-6}s بعد الانفجار العظيم، انخفض عدد البروتونات والنيوترونات والجسيمات الثقيلة الأخرى كلّها بشكل هائل. وقد اختفت الهادرونات الأخف، والبيونات كما حصل للنيوكليونات؛ لأنّها أقلّ الهادرونات كتلة (140 MeV). وقد كانت آخر الهادرونات التي تختفي بعد نحو 10^{-4}s من الانفجار العظيم. أما الجسيمات الخفيفة التي تضم أيضًا الإلكترونات والنيوترينوات، فقد كانت الشّكل السائد للمادة. وهكذا، دخل الكون إلى **حقبة الليبتون**.

حقبة الليبتون

وبمرور الوقت، وبعد أن مرّت أول ثانية كاملة (أكثر ثانية مليئة بالأحداث في التاريخ) برد الكون إلى 10 مليارات درجة تقريبا، أي 10^{10} K. لقد كان متوسط الطاقة الحركية نحو 1 MeV. وما زالت هذه الطاقة كافية لخلق إلكترونات، وبوزترونات، وتوازن تفاعلات الفناء الخاصة بهم؛ لأنّ كتلتيهما تقابل طاقة تصل إلى نحو 0.5 MeV . لذلك، فقد كان عدد e^+، و e^- مساويًا لعدد الفوتونات. ولكن خلال ثوان أكثر قليلا، انخفضت درجة الحرارة بشكل كبير بحيث لم يعد يتشكل e^+، و e^-. واستمرت عملية الفناء ($e^+ + e^- \rightarrow$ فوتونات). وكما حدث للنيوكليونات من قبل، فقد اختفت الإلكترونات والبوزترونات جميعها من الكون باستثناء فائض بسيط من الإلكترونات (تشترك فيما بعد مع الأنوية لتشكيل الذرات). لذلك، بعد الانفجار العظيم بنحو 10s، دخل الكون **حقبة الإشعاع**. لقد كانت المكونات الرئيسة فوتونات ونيوترينوات. ولكن النيوترينوات تشارك فقط في حالة القوة الضعيفة وهي نادرة التفاعل. لذا، فإنّ الكون منذ ذلك الحين يشتمل على كميات وفيرة من الطاقة في المادة والإشعاعات. وبهذا، فقد أصبح الآن تسوده الإشعاعات؛ كانت الإشعاعات تحتوي على طاقة بكميات أكثر بكثير من تلك التي في المادة، وقد دام ذلك لعشرات الآلاف من السنين (الشّكل 33 – 25).

كون يسوده الإشعاع

وفي غضون ذلك، وخلال الدقائق القليلة اللاحقة، حدثت وقائع مهمّة. بداية بعد حوالي دقيقتين أو ثلاث دقائق بعد الانفجار العظيم بدأ الاندماج النووي بالحدوث. لقد انخفضت درجة الحرارة إلى نحو 10^9K، وهو ما يقابل متوسط الطاقة الحركية $\overline{KE} \approx 100$ keV حيث يمكن للنيوكليونات مهاجمة بعضها لتندمج (بند 31 – 3)، ولكنها بردت الآن بشكل كاف بحيث لا يمكن للأنوية المتشكلة حديثًا الانفصال إلى مكوناتها في الحال نتيجة للتصادمات المتوالية. ومن المحتمل الآن أن تكون أنوية الديوتيريوم، والهيليوم وكميات قليلة من الليثيوم قد تشكلت. ولكن الكون كان يبرد بسرعة والأنوية الكبيرة لم تتشكل بعد. وبعد دقائق قليلة فقط، ربما أقلّ من ربع ساعة بعد الانفجار العظيم، انخفضت درجة الحرارة بشكل كبير بحيث توقف تشكيل النيوكليونات، والذي لن يبدأ مرة أخرى لملايين السنين (في النّجوم). لذا، بعد أول ساعة أو ما يقارب ذلك من عمر الكون، تكوّنت المادة بشكل أساسي من أنوية مجردة من الهيدروجين (نحو 75%) والهيليوم (25% تقريبا)* والإلكترونات. أمّا الإشعاعات (الفوتونات) فما زالت هي السّائدة.

تشكّل أنوية *He*

* يتفق تنبؤ هذا النموذج المعياري بإنتاج 25% من الهيليوم مع ما نشاهده في الوقت الحاضر – يحتوي الكون على 25% من الهيليوم – وهو دليل قوي يدعم النموذج المعياري للانفجار العظيم. علاوة على ذلك، فإنّ النّظريّة تقول إنّ نسبة وفرة 25% من الهيليوم تتفق تمامًا مع وجود ثلاثة أنواعٍ للنيوترينو – وهو العدد الذي نشاهده في الوقت الحاضر. وقد وضعت حدًّا أعلى مقداره أربعة لأقصى عدد ممكن لأنواع النيوترينو. ولدينا هنا حالة حيث قدم علم الكونيّات تنبؤًا معينًا عن الفيزياء الأساسية.

لقد اكتمل موضوعنا تقريبًا. إنّ الحادثة المهمّة التالية يفترض وقوعها بعد حوالي 380,000 سنة، حيث تمدد الكون إلى نحو $\frac{1}{1000}$ من حجمه الحالي، وانخفضت درجة الحرارة إلى 3000K تقريبًا. لقد كان متوسط الطاقة الحركية للأنوية والإلكترونات والفوتونات أقلّ من إلكترون فولت واحد. وبما أنّ طاقات تأيّن الذرات من رتبة الإلكترون فولت، وبعد أن انخفضت درجة الحرارة إلى أقلّ من ذلك، فإنّ الإلكترونات يمكن أن تدور حول الأنوية المجردة وتبقى هناك (دون أن يحدث لها انبعاث بواسطة التصادمات) وتتشكل الذرات. ومع ولادة الذرات، فقد أصبحت الفوتونات – التي كانت تتبعثر باستمرار من الإلكترونات الحرة – الآن حرّة تنتشر دون عوائق، تقريبًا، خلال الكون. وكما أشرنا في البند السابق، فإنّ الفوتونات أصبحت مفصولة عن المادة. لقد قلّت الطاقة الكلية الموجودة في الإشعاعات (الاستطالة في الطول الموجي كلّما تمدد الكون) وحتى قبل حدوث الانفصال (عند حوالي 56,000 سنة) كانت الطاقة الكلية الموجودة في المادة سائدة على تلك التي في الإشعاعات. لقد قيل إنّ الكون أصبحت **تسوده المادة**. كلما تمدد الكون، تبرد الإشعاعات الكهرومغناطيسية أكثر لتصل إلى 2.7 K في الواقع الحاضر لتشكّل الخلفية الإشعاعية للمايكروويف الكونية التي نكشف عنها من أيّ مكان في الكون.

ولادة الذرات المستقرة

المادة تسود الكون

وبعد ولادة الذرات، بدأت النّجوم والمجرات تتشكل – فرضيًّا بواسطة الجاذبيّة الذاتية حول تكدّسات (غير متجانسة) الكتلة. وقد بدأت النّجوم بالتكون بعد نحو 200 مليون سنة من الانفجار العظيم. أمّا المجرات، فقد تكونت تقريبًا بعد 10^9 سنة تقريبا. وما زال الكون يتطور حتى يومنا هذا بعد 13.7 مليار سنة تقريبًا على نشأته.

* * *

لم يتم إثبات هذا الافتراض بأيّ طريقة كانت، ولكنه يعطي، وللمرة الأولى، صورة عملية عن كيفية بداية الكون وتطوره.

وهناك حادثة رئيسة اكتشفت حديثًا فقط، هي أنّ الكون عندما كان في منتصف عمره الحالي (قبل حوالي 5 – 7 مليارات سنة)، بدأ تمدده يتسارع. وقد كان هذا مفاجأة كبيرة؛ لأنّه كان قد افترض أنّ تمدد الكون يجب أن يتباطأ بسبب التجاذب الكتلي للأجسام جميعها بين بعضها بعضا. وبالفعل، فإنّ اكتشافًا آخر رئيسًا وحديثًا يدل على أنّ المادة المألوفة تشكل كمية قليلة جدًّا من مجموع كتلة – طاقة الكون ($\approx 4\%$). بالإضافة إلى ذلك، وكما سيناقش في البند التالي، فإنّ المساهمات الرئيسة لكثافة الطاقة الكونية هي المادة المظلمة والطاقة المظلمة كذلك.

إلى يمين (الشّكل 33 – 25) هناك شريط رأسيّ ضيق يمثّل أحدث 5 إلى 7 مليارات سنة من عمر الكون، والتي يبدو خلالها أنّ الطاقة المظلمة هي السّائدة.

8-33 المادة المظلمة والطاقة المظلمة

بناءً على النموذج المعياري للانفجار العظيم، فإنّ الكون يتطور ويتغير، حيث تخلق النّجوم الفردية وتتطور، ثم تموت كأقزام بيض، أو نجوم نيوترونية، أو ثقوب سود. أحد الأسئلة المهمة هو: هل سيستمر الكون في التّمدد إلى الأبد؟ لقد كان يعتقد حتى أواخر خمسينيّات القرن الماضي أنّ الكون تسوده المادة التي تتفاعل بواسطة الجاذبيّة، وقد كان هذا السؤال مرتبطًا بانحناء الفراغ – الزمن (البند 33 – 4). إذا كان للكون انحناء سالب، فإنّ تمدد الكون سوف لن يتوقف، على الرغم من أنّ معدل التمدد يجب أن يقلّ بسبب التجاذب (الكتلي) بين أجزائه. مثل هذا الكون يكون مفتوحًا ولا نهائيّ. فإذا كان الكون مستويًا (دون انحناء)، فإنّ الكون ما يزال مفتوحًا ولا نهائيًّا، ولكن معدل تمدده يقترب ببطء من الصفر. وأخيرًا، إذا كان للكون انحناء موجب، فيجب أن يكون مغلقًا ونهائيًّا، ويكون للجاذبية تأثير قويّ فيه بشكل كافٍ، بحيث يتوقف التمدد أخيرًا، ويبدأ الكون بالانكماش، وينهار على نفسه مصدرًا **صوتًا هائلا**.

يتفق هذا النموذج القياسي الذي يمثل *25%* من الهيليوم البدائي مع ما نلاحظه اليوم، فالكون يحتوي على *25%* من تركيبة هيليوم، وهذا دليل قوى يدعم نموذج الانفجار العظيم القياسي. إضافة لذلك، تقول النظرية أن وجود 25% من الكون من مادة الهيليوم يتوافق مع وجود ثلاثة انواع نيوترينو، وهذا هو العدد الذي نلاحظه. وهذا يضع الحد الاعلى لانواع النيوترينو لتكون أربع، وهنا يوجد لدينا وضع في علم الكونيات يتوقع بصورة دقيقة حول الفيزياء الأساسية للكون.

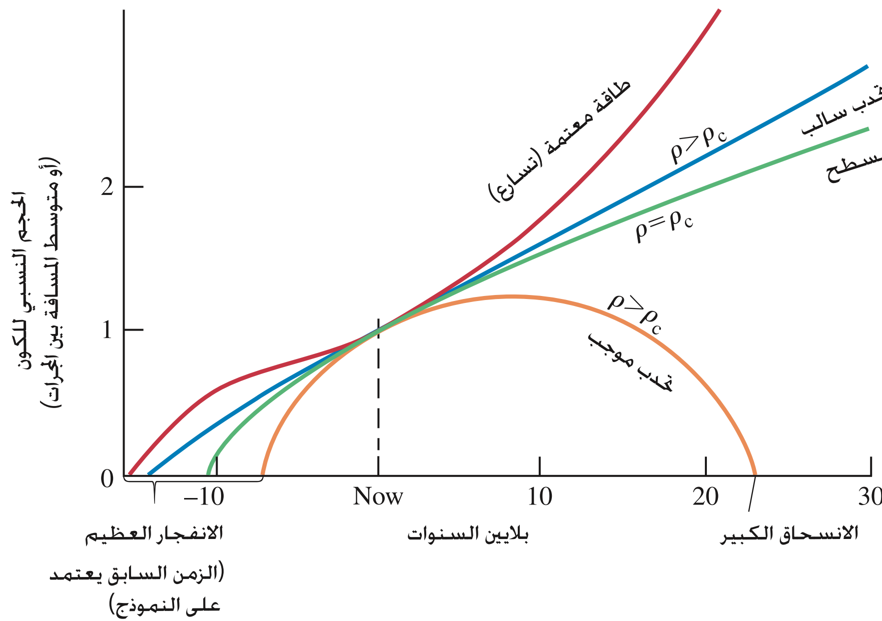
الكثافة الحرجة

وفقًا للسيناريو أعلاه (الذي لا يتضمن الاكتشاف الحديث لتسارع الكون) فإنّ نهاية الكون تعتمد على متوسط كثافة الكتلة في الكون. لمتوسط كثافة الكتلة التي تبلغ أكبر من قيمة حرجة تُسَمّى **الكثافة الحرجة**، والتي قدرت بنحو

كثافة الكون الحرجة

$$\rho_c \approx 10^{-26}\,\mathrm{kg/m^3}$$

(أي، في المتوسط نيوكلونات قليلة لكل متر مكعب خلال الكون). ويجب أن تمنع الجاذبيّة استمرار تمدد الكون إلى ما لا نهاية. أخيرًا (إذا ما كانت $\rho > \rho_c$) فإنّ الجاذبيّة تجذب الكون إلى العكس بقوة ويكون انحناء "الزمان – المكان" موجبًا. إذا كانت الكثافة الحقيقية مساوية للكثافة الحرجة $\rho = \rho_c$ ، فإنّ الكون يكون مستويًا ومفتوحًا. أما إذا كانت الكثافة الحقيقية أقل من الكثافة الحرجة $\rho < \rho_c$ ، فإنّ انحناء الكون يكون سالبا. انظر إلى (الشّكل 33 – 26). في الوقت الحاضر نعتقد أنّ الكون قريب جدًّا من أن يكون مستويًا. لكن الدليل الحالي يقترح أنّ الكون يتمدد بمعدل متسارع، كما سيناقش لاحقا.



الشّكل 33 – 26 ثلاثة احتمالات مستقبلية للكون اعتمادًا على كثافة المادة الاعتيادية، واحتمال رابع يتضمن الطاقة المظلمة. لاحظ أنه تم اختيار المنحنيات جميعها ليكون لها الآن الميل نفسه (معامل هبل ، H =). بالعودة إلى الزمن الماضي حدث الانفجار العظيم حيثما لامس كل منحنى المحور الأفقي (الزمن).

المادة المظلمة

المادة المظلمة

اقتنع العلماء من نتائج WMAP وتجارب أخرى أنّ الكون مستوٍ وأنّ $\rho = \rho_c$، ولكن ρ هذه لا يمكن أن تكون فقط مادة باريونية عادية (99.9% من وزن الذرات هي بريونات – بروتونات ونيوترونات). لقد حددت هذه التجارب الحديثة كمية المادة الباريونية العادية في الكون بـ 4% فقط من الكثافة الحرجة. ولكن، ما هي 96% الأخرى؟ هناك دليل قوي على وجود كمية مهمة من مادة غير مضيئة في الكون تُسَمّى **المادة المظلمة**. فعلى سبيل المثال، تقترح مشاهدات دوران المجرات بأنها تدور كما لو أنّ كتلتها أكثر ضخامة مما يمكن رؤيته. تذكر من (الفصل 5)،
(المثال 5 – 14) بالنسبة للقمر الصناعي الذي يدور حول الأرض (كتلتها M) أنّ:

$$m\frac{v^2}{r} = G\frac{mM}{r^2}$$

وبالتالي فإنّ $v = \sqrt{GM/r}$. إذا طبقنا هذه المعادلة على النّجوم في المجرة، فسنلاحظ أنّ سرعاتها تعتمد على كتلة المجرة. تبين المشاهدات أنّ النّجوم البعيدة عن مركز المجرة تدور بشكل أسرع مما يتوقع من المادة المرئية، وهو ما يدل على وجود مادة غير مرئية ضخمة. وبالمثل، فإنّ مشاهدات حركة المجرات داخل التجمعات تقترح أيضًا أنّ لها كتلة أكثر ضخامة مما يمكن رؤيته. فماذا يمكن أن تكون هذه المادة **المظلمة الموجودة** في الكون؟ لا نعرف حتى الآن. لا يمكن أن تكون مكونة من مادة (باريونية) عادية. لذا، فإنّها تتكون من نوع آخر من الجسيمات الأولية.

تشكّل المادة المظلمة نحو 23% من كتلة – طاقة الكون وفقًا لأحدث التجارب. وهكذا، فإنّ "الكتلة – الطاقة" الكلية هي 23% مادة مظلمة زائد 4% باريونات، مما يشكّل ما مجموعه 27%، وهذا لا يجعل ρ تقترب من ρ_c ما النسبة الباقية التي تشكل 73%؟ لسنا متأكدين من ذلك أيضًا، ولكنّنا أسميناها "الطاقة المظلمة".

الطّاقة المظلمة – تسارع الكون

قبل عام 2000 بقليل، استقبل علماء الكونيّات مفاجأة. لقد افترض أنّ الجاذبيّة هي القوة السّائدة على نطاق واسع في الكون، وكان يعتقد أنّ تمدد الكون يجب أن يتباطأ مع الزّمن لأنّ الجاذبيّة تعمل كقوة تجاذب بين الأجسام. لكن الأقيسة التي تمت على سوبرنوفا من النوع Ia (SNIa – أفضل الشمعات المعيارية – انظر البند 33 – 3) توضح بشكل غير متوقع أنّ SNIa البعيدة (z مرتفعة) أكثر ظلمة من التوقعات. أي أنّه إذا أعطيت مسافاتها البعيدة d كما تم تحديدها من إضاءاتها القليلة، وتم تحديد سرعاتها v من قيمة z المقيسة فإنّها أقلّ مما هو متوقع حسب قانون هَبِلْ. وتدلُّ هذه النتيجة على أنّ المجرات القريبة تتحرّك بعيدًا عنا أسرع نسبيًّا من تلك البعيدة، وهذا يعني تسارع تمدد الكون في الحقب الحديثة. ويبدو أنّ (تسارع) هذا التمدد في الكون (بدلا من التباطؤ المتوقع بسبب التجاذب الكتلي) قد بدأ قبل نحو 5 مليارات سنة(أي بعد الانفجار العظيم بحوالي 8×10^9 إلى 9×10^9سنة).

تتسارع

ما الذي قد يجعل الكون يتسارع في تمدده بشكل مضاد لقوة التجاذب الكتلي؟ وهل فهمنا للجاذبية بحاجة إلى مراجعة؟ لا نعرف إجابات هذه الأسئلة؛ يقول العديد من العلماء إنّ الطاقة المظلمة هي أكبر لغز يواجه العلم في الوقت الحاضر. هناك تخمينات عديدة. ولكن بطريقة أو بأخرى، فقد يبدو أنّها تؤثّر في المادة بقوة تنافر طويلة المدى مما يجعل الأجسام تتسارع بعيدًا بعضها عن بعض بسرعة أكثر من أيّ وقت. ومهما تكن، فقد أعطيت اسم **الطاقة المظلمة**.

الطاقة المظلمة

وهناك فكرة أخرى هي نوع من المجال الكمي الذي أُعطي اسم "الجوهر". كما أنّ هناك احتمالية أخرى تقترح أنّ الطاقة كامنة في الفراغ نفسه (طاقة الفراغ) وترتبط بميزة من النسبية العامة تُسَمّى **الثابت الكوني** (رمزه Λ). وعندما طور آينشتاين معادلاته، وجد أنها لا تقدم حلولا للكون الساكن. في تلك الأيام (1917) كان يعتقد أنّ الكون ساكن، أي أنّه لا يتغير وأبدي. لقد أضاف آينشتاين ثابتًا إلى معادلاته لتعطي حلولا للكون الساكن. وبعد عِقد من الزمان عندما بيّن لنا هَبِلْ أنّ الكون يتمدد، أهمل آينشتاين الثابت الكوني فلم يعد هناك حاجة إليه ($\Lambda = 0$). أمّا الآن، فقد أُخذ هذا الثابت بالحسبان، فلربما Λ لا يساوي صفرًا. أما المحاولات النّظريّة لحساب Λ فقد أعطت قيمًا غير حقيقية.

الثابت الكونيّ

هناك دليل متزايد على أنّ تأثيرات نوع ما من الطاقة المظلمة هي حقيقية جدًّا. وتتفق البيانات التي تم الحصول عليها من WMAP وتجارب أخرى حديثة بشكل جيد مع نظريات ونماذج حاسوبية أُدخلت فيها الطاقة المظلمة لتعطي 73% من "الكتلة – الطاقة" في الكون، وعندما يتساوى المجموع الكلي لكثافة "الكتلة – الطاقة" مع الكثافة الحرجة Cp .

أفضل التخمينات في الوقت الحاضر عن كيفية توزيع الكتلة – الطاقة في الكون هي كما يلي:

أنواع الكتلة – الطاقة في الكون كنسب مئوية.

73% طاقة مظلمة

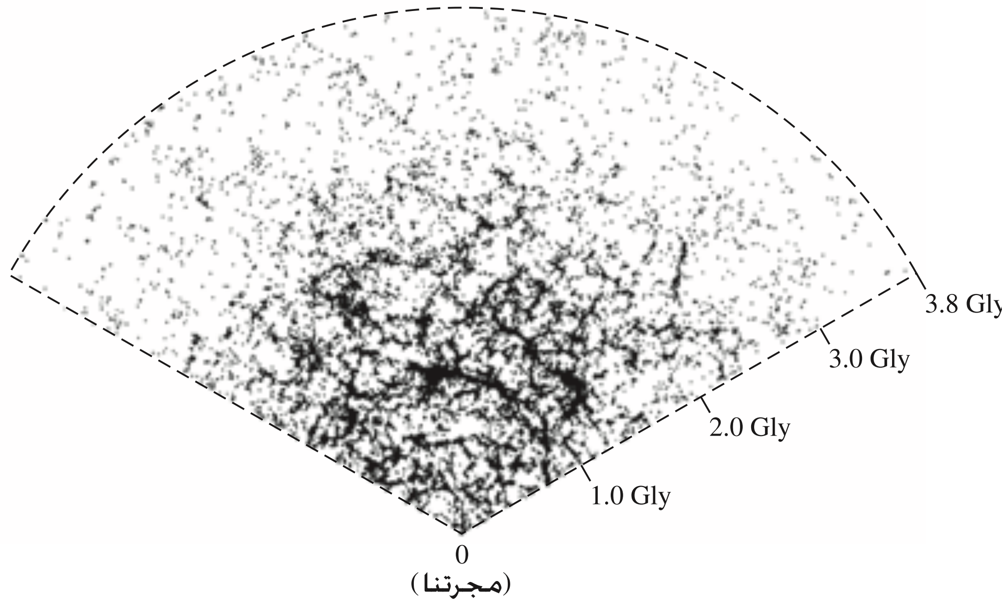
27% مادة، إضافة إلى قوة جاذبية معروفة من هذه النسبة البالغة 27%.

23% مادة مظلمة

4% بريونات (ما تتشكل منه الذرات) و $\frac{1}{10}$ من 4% مادة مرئية فقط: النّجوم والمجرات (أي ما مجموعه 0.4%).

ومن الجدير بالملاحظة أنَّ 0.4% فقط، من "كلّ الكتلة – الطاقة" الموجودة في الكون مرئيةٌ مثل النّجوم والمجرات.

تبدو فكرة أنَّ الكون يسوده بالكامل شكل غير معروف من الطاقة أمرًا غريبًا. وعلى الرغم من ذلك، فإنّ الاتفاق الرائع بين النّظريّة ومشاهدات عدم انتظام CMB المقيسة، بالإضافة إلى بيانات تجريبية أخرى (تجمعات المجرات – انظر البند التالي) تبدو ذات معنى.



الشّكل 33–27: توزيع 50,000 مجرّة بزاوية $2.5°$ يمتد خلال نصف السماء تقريبًا فوق خط الاستواء، كما تم قياسه بواسطة ماسح السماء الرقمي (SDSS). تمثل كلّ نقطة مجرّة. تم الحصول على بعد هذه المجرات عنا من الإزاحة الحمراء وقانون هَبِل، وقد أعطيت بوحدات 10^9 سنة ضوئية (Gly). وعند المسافات البعيدة، فإنّ بعض المجرات القليلة تكون إضاءتها كافية حتى يتم اكتشافها، وينتج من ذلك التباعد الظاهريّ للمجرات. النقطة 0 تمثلنا وهي نقطة المراقبه. لاحظ جدران وفراغات المجرات.

9-33 تركيب الكون على نطاق واسع

إنّ صور WMAP الرائعة التي التقطت للسماء (الشّكل 33 – 23 والصورة الافتتاحية للفصل) تبين عدم تجانس قليل، ولكنه مهم في درجة حرارة CMB. إنّ عدم التجانس هذا يعكس انبساط البلازما الأصلية وتمددها قبل انفصالها لتتشكل منها النّجوم، والمجرات والعناقيد المجرّية. إنّ تحليل عدم الانتظام في WMAP بالمحاكاة الحاسوبية يتنبأ بتوزيع العناقيد المجرّية والعناقيد المجرّية الفائقة، وهو يشبه ما نراه في الوقت الحاضر (الشّكل 33 – 27). وتعدّ هذه المحاكاة ناجحة جدًّا إذا اشتملت على الطاقة المظلمة والمادة المظلمة، التي يجب أن تكون باردة (فكرّ في المعادلة 13 – 8، $\frac{1}{2}m\overline{v}^2 = \frac{3}{2}kT$، حيث T درجة الحرارة) بدلا من أن تكون مادة مظلمة ساخنة مثل النيوترينوات التي تسير بسرعة الضّوء أو قريبًا منها. وبالفعل، فإنّ نموذج علم الكونيّات الحديث يُسَمّى نموذج **ΛCDM** حيث يشير الرمز (Λ) إلى التباين الكوني، في حين CDM إلى المادة المظلمة الباردة.

النموذج الكونيّ ΛCDM.

لقد اكتسب علماء الكونيّات ثقة حقيقية في هذا النموذج الكونيّ بسبب التوافق الدقيق بين المشاهدات والنّظريّة. كما يمكنهم أيضًا استخلاص قيم دقيقة جدًّا للمعاملات الكونية التي كانت معروفة في السابق بدقة قليلة. إنّ CMB الكونية مهمة وقابلة للمشاهدة بحيث يمكن بذل الجهد كلّه لاستخلاص المعلومات جميعها التي تحتويها. لقد تم إعداد بعثات فضائية كثيرة لمراقبة أدقّ التفاصيل. ويمكن لهذه البعثات إعطاء دليل تجريبيّ للانتفاخ. وربما اكتشاف موجات جاذبية تنبأت بها نماذج الانتفاخ (يمكن الكشف عنها بواسطة تأثيرها في CMB) بالإضافة إلى المعلومات التي قد تقدمها عن فيزياء الجسيمات الأولية عند طاقات لا تصلها المسارعات التي صنعها الإنسان.

10-33 أخيرًا

عندما ننظر إلى السماء المظلمة نشاهد النّجوم، وباستخدام أفضل التلسكوبات نرى المجرّات إضافة إلى الأجسام الغريبة التي نوقشت سابقًا، ومنها السوبرنوفا النادرة. ولكن حتى باستعمال أفضل أجهزة المراقبة، فإنّنا لا نرى العمليات التي تحدث داخل النّجوم أو السوبرنوفا التي افترضنا وجودها ونعتقد أيضا بوجودها. إننا في الحقيقة نعتمد على عباقرة قدموا نظريات يمكن تطبيقها، وأفكارًا، بالإضافة إلى نماذج يمكن اختبارها. كما أننا نعتمد على نماذج حاسوبية معقدة تتغير معاملاتها حتى تتفق مخرجاتها مع تحليلات ومشاهدات تجارب WMAP وغيرها.

وأخيرًا، لدينا الآن فكرة دقيقة ومدهشة عن بعض صفات كوننا: إنه مستوٍ، عمره 13.7 مليار سنة، ويحتوي على 4% فقط من مادة باريونية عادية (للذرات) وهكذا. وتشير هذه النتائج الدقيقة إلى أنّنا نعيش في وقت مثير جدًّا.

إن الأسئلة التي يطرحها علم الكونيّات صعبة ويصعب فهمها أيضًا. ويمكن إغفالها في حياتنا اليومية الحقيقية. ويمكننا دائمًا القول. "إنّ الشّمس تشع وستستمر في حرق الوقود إلى زمن طويل جدًّا لا يمكن تخيله. وكلّ هذا جميل". وعلى الرغم من ذلك. فإنّ أسئلة علم الكونيّات عميقة وتفتن العقل البشري. والصفة المثيرة على وجه الخصوص هي ما يلي: إنّ الحسابات التي أجريت على تشكّل الكون ونشأته غيّرت على نحو متأنٍّ القِيَمَ — قليلاً فقط — لبعض الثوابت الفيزيائيّة الأساسية. والنتيجة هي أنّ الكون الذي عليه الحياة التي نعرفها كان من الممكن ألا يكون موجودًا. [على سبيل المثال. إذا كان الفرق في الكتلة بين البروتون والنيوترون صفرًا. أو قليلا (أقلّ من كتلة الإلكترون $0.511\ MeV/c^2$) فيجب ألا تكون هناك ذرات: الإلكترونات التي تأسرها البروتونات سوف لن تتحرر مرة أخرى]. لقد أدت هذه النتائج إلى فكرة فلسفية تسمّى **"قاعدة الانسان" (مبدأ الأنتروبي)** التي تقول: لو أنّ الكون كان مختلفًا قليلا عما هو عليه. لما كنّا نحن هنا. ويبدو أنّ الكون مُعَدٌّ بشكل متقن لكي يستضيفنا؛ فسبحان الله العظيم!

مبدأ الأنتروبي

ملخص

- تحتوي السماء في الظلام على عدد ضخم من النّجوم بما فيها تلك التي في **درب التبانة**، التي هي "منظر جانبي" لمجرتنا ينظر إليها على طول مستوى القرص. تحتوي مجرتنا على 10^{11} نجم تقريبا. أما بعد مجرتنا، فهناك مليارات من المجرات الأخرى.

- تُقاس الأبعاد الفلكيّة **بالسنة الضوئية** ($1\ ly \approx 10^{13}\ km$). إنّ أقرب النّجوم تقع على بعد 4 سنوات ضوئية، أما أقرب مجرة كبيرة فهي على بعد مليوني سنة ضوئية. يبلغ قطر قرص مجرتنا نحو 100,000 سنة ضوئية. تحدد المسافات عادة بالفراسخ الفلكيّة، حيث إنّ كلّ فرسخ فلكيّ = 3.26 سنة ضوئية.

- يعتقد أنّ حياة النّجوم قد بدأت نتيجة لانهيار كتل من غاز الهيدروجين (نجوم بروتونية). وعندما انكمشت، ارتفعت حرارتها (تحولات الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية). عندما وصلت درجة الحرارة إلى حوالي عشرة ملايين درجة، بدأ الاندماج النووي، وتكونت العناصر الثقيلة **(تكون النيوكليونات)** وخصوصًا الهيليوم الذي تشكل أولا. تعمل الطاقة المتحررة خلال هذه التفاعلات على تسخين الغاز بحيث يوازن الضغطُ الخارجيّ قوةَ الجاذبيّة الداخلية، ويستقر النّجم الصغير كنجم تسلسل أساسي. تصدر الإضاءة الهائلة للنجوم من الطاقة المتحررة خلال هذه التفاعلات النّوويّة الحراريّة. بعد مليارات السنين، عندما يتجمع الهيليوم في القلب ويستنفد الهيدروجين، ينكمش القلب وتزداد حرارته. يتمدد الغلاف الخارجي ويبرد، ويصبح النّجم **عملاقًا أحمر** (قطر أكبر، لون أحمر). تعتمد المرحلة التالية من نشأة النّجم على كتلته، الذي قد يكون فقد الكثير منها بسبب انفصال غلافه الخارجي وهروبه إلى الفضاء. فالنّجوم التي كتلتها المتبقية أقلّ من حوالي 1.4 من كتلة الشّمس تبرد، وتصبح **قزمًا أبيض** يتضاءل تدريجيًّا، ومن ثمَّ يخبو.

- تنكمش النّجوم الثقيلة أكثر بسبب جاذبيتها الكبيرة: تقترب الكثافة من الكثافة النّوويّة، ويرغم الضغط الهائل الإلكترونات على الاتحاد مع البروتونات لتشكيل نيوترونات، ويصبح النّجم أساسًا نواة ضخمة من النيوترونات.

وهذا هو **النّجم النيوتروني**، الطاقة المتحررة من الانهيار الأخير لقلبه يعتقد بأنّها تنتج **انفجارات السوبرنوفا**. إذا كان النّجم أكثر ثقلًا فإنّه ينكمش كثيرًا، ويشكل **ثقبًا أسود** ذا كثافة كبيرة؛ بحيث لا يمكن لأيّ مادة أو ضوء الانفلات منه.

- ينص مبدأ التكافؤ في **نظرية النسبية العامة** على أنّ المشاهد لا يمكن أن يميز التسارع من المجال الجاذبي؛ أي أنّ الجاذبيّة وقصور الكتل هي الشيء ذاته. تتنبأ النّظريّة بانحناء جاذبي لأشعة الضَّوء إلى درجة تتفق مع التجربة. تمت معالجة الجاذبيّة على أنها انحناء في الفضاء والزمن، ويكون الانحناء أكبر بالقرب من الأجسام الثقيلة.

وقد يكون الكون كله منحنيًا. تجعل زيادة الكتلة انحناء الكون موجبًا ويقال إنّ الكون مغلق ومحدود، وإلا فإنّه مفتوح ولا نهائيّ.

يظهر في الخطوط الطيفية للمجرات البعيدة **إزاحة نحو اللون الأحمر**، تعرف بإزاحة دوبلر. يبدو أنّ الكون **يتمدد**، ومجراته تبتعد سريعًا عن بعضها بسرعة (υ) تتناسب مع المسافة (d) التي تفصل بينها:

$$\upsilon = Hd \qquad \textbf{(33 – 6)}$$

وهذا ما يعرف بقانون هَبِلْ (حيث H هو **معامل هَبِلْ**). هذا التمدد للكون يقترح أنه نشأ نتيجة للانفجار العظيم الذي حدث قبل نحو 13.7 مليار سنة.

- يفترض المبدأ الكوني أنّ الكون على نطاق واسع متجانس وخصائصه موحدة.

- يعدّ اكتشافُ الخلفية **الإشعاعية الكونية للميكروويف** (CMB) التي تنطبق على منحنى الجسم الأسود عند درجة الحرارة $2.725\ K$ الدليلَ المهمَّ الذي يؤيّد نموذج الانفجار العظيم للكون.

- يقدم **النموذج المعياري** للانفجار العظيم مقترحا محتملا عن كيفية تطور الكون عندما تمدد وبرد بعد الانفجار العظيم. بداية عند $10^{-43}\ s$ بعد الانفجار العظيم، ووفقًا لهذا النموذج، كانت هناك سلسلة من **التحولات الطورية** انفصلت خلالها القوى التي كانت موحدة في الطبيعة واحدة تلو الأخرى.

-يفترض **سيناريو الانتفاخ** أنه خلال إحدى مراحل التحول هذه حدث للكون تمدد أسّيّ سريع، ولكنه خاطف. حتى $10^{-35}\ s$ لم يكن هناك ما يميز بين الكواركات واللبتونات. ولكن بعد ذلك بوقت قصير، **حصرت** الكواركات في الهادرونات **(حقبة الهادرونات)**. وبعد الانفجار العظيم بنحو $10^{-4}\ s$ اختفت غالبية الهادرونات باتحادها مع الهادرونات المضادة لتنتج فوتونات وليبتونات وطاقة، تاركة الفوتونات والليبوتونات حرة الحركة تمهيدًا **لحقبة الليبتون**.

بمرور الوقت، عندما أصبح عمر الكون نحو $10\ s$، اختفت غالبية الإلكترونات أيضًا، وذلك باتحادها مع جسيماتها المضادة؛ **وسادت الإشعاعاتُ** الكونَ. وبعد دقيقتين، بدا تركيب النيوكليونات، ولكنه لم يستمر إلا إلى دقائق معدودة فقط.

ثمّ يحتاج الكون إلى عدّة مئات من آلاف السنين قبل أن يبرد بشكل كاف بحيث تتحد الإلكترونات مع الأنوية لتشكيل الذرات. لقد تمددت الخلفية الإشعاعية وبردت كثيرًا بحيث أصبحت الطاقة الكلية أقلّ من الطاقة في المادة، وسادت المادة بشكل متزايد على الإشعاعات. ثم تشكلت النّجوم والمجرات منتجة كونًا لا يختلف كثيرًا عما هو عليه الآن بعد 13 مليار سنة تقريبا.

تشير المشاهدات الحديثة إلى أنّ الكون مستوٍ بحيث إنّه يحتوي على نوع غير معروف من **المادة المظلمة**، وتسوده **طاقة مظلمة** محيرة تؤثر بجاذبية سالبة، تجعل تمدد الكون متسارعًا.

يشير الدليل في الوقت الحاضر إلى أن الكونّ مستوٍ، وسيستمر في تمدده بشكل غير محدود. المساهمة الكلية من المادةً (الطبيعية) الباريونية، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة، تضاف إلى **الكثافة الحرجة**.

أسئلة

1. كان يعتقد في وقت ما أنّ درب التبانة كثيرة الضباب أو أنّها لبنيّة، أمّا الآن فتعدّ أنّها مكونة من مصادر نقطية. فسّر ذلك.

2. يعدّ النّجم متوازنًا عندما يشع على سطحه الطاقة التي أنتجت في قلبه. ماذا يحدث عندما يبدأ بإنتاج طاقة أكثر مما يشع؟ طاقة أقلّ؟ فسّر ذلك.

3. صف نجمًا عملاقًا أحمر، واذكر بعضًا من خصائصه.

4. اختيار نقطة ما على المخطط البياني $H - R$. حدد عدة اتجاهات بعيدًا عن هذه النقطة. صف الآن التغيرات التي يجب أن تحدث في نجم يتحرك في كلّ اتجاه من هذه الاتجاهات.

5. هل يوحي المخطط البيانيّ $H - R$ بأيّ شيء عن قلب النّجم؟

6. لماذا تنتهي بعض النّجوم إلى أقزام بيض، وبعضها الآخر إلى نجوم نيوترونية أو ثقوب سود؟

7. هل يمن القول عند النظر إلى المخطط البياني $H - R$ إنّ نجوم التسلسل الأساسي الساخنة ذات عمر قصير؟ فسّر ذلك.

8. إذا كنت تقوم بقياس التغيرات الظاهرية في موقع نجم ما من القمر بدلًا من الأرض، فما التعديلات التي يجب القيام بها؟ ما التغيرات التي يجب أن تحدث إذا كنت تقيس التغيرات الظاهرية في موقع النّجم من المريخ؟

9. يتغير سطوع النّجوم القيفاوية المتغيرة خلال مدة مثالية تبلغ عدة أيام. لقد وجد أنّ هذه المدة ترتبط بعلاقة محددة مع السطوع المطلق للنجم. كيف يمكن استخدام هذه النّجوم في قياس المسافة إلى المجرات؟

10. ما المقصود بخط الجيوديسك؟ ما دوره في النّظريّة النسبية العامة؟

11. إذا اكتشفنا أنّ الإزاحة نحو اللون الأحمر التي تظهر في الخطوط الطيفية للمجرات كانت بسبب شيء آخر غير التمدد، فكيف تتغير نظرتنا للكون؟ هل يكون هناك تناقض مع الدليل؟ ناقش ذلك.

12. تظهر المجرات جميعها وكأنها تتحرك بعيدًا عنا. هل يدلّ ذلك على أنّنا في مركز الكون؟ فسّر ذلك.

13. إذا وضعت في مكان ما في مجرة بالقرب من حدّ الكون الذي يمكن مشاهدته، فهل تظهر المجرات التي فيه اتجاه درب التبانة مقتربة منك أم بعيدة عنك؟ فسّر ذلك.

14. قارن بين انفجار على الأرض مع الانفجار العظيم. افترض الأسئلة التالية: هل يجب أن ينتشر الحطام عند سرعات عالية للجسيمات البعيدة كما في الانفجار العظيم؟ هل يعود الحطام إلى السكون؟ ما نوع الكون الذي يماثل ذلك؛ مفتوح أم مغلق؟

15. إذا لم يفلت أيّ شيء من الثقب الأسود، حتى الضَّوء، فكيف يمكن إذن أن تقول إنّ أحدًا هناك؟

16. ما الكتلة التي تعطي نصف قطر شوارزشيلد مساوٍ لذاك الذي لذرة الهيدروجين في حالتها الأرضية.

17. غالبًا ما يقدر عمر الأرض على أنه 4 مليارات سنة. جد ذاك الزمن على (الشّكل 33 – 25). مدة حياة الناس على الأرض في حدود المليون سنة. أين ذاك الزمن على (الشّكل 33 – 25).

18. ما المقصود بالخلفية الإشعاعية الكونية للمايكروويف عند درجة الحرارة 2.7 K؟ من أين جاءت؟ لم درجة حرارتها قليلة جدًّا الآن؟

19. لماذا كانت الذرات، على العكس من الأنوية المجردة، غير قادرة على الوجود حتى مرور مئات آلاف السنين على الانفجار العظيم.

20. ما الظروف التي بوجودها ينهار الكون أخيرًا على نفسه؟

مسائل

33 – 1 إلى 33 – 3 النّجوم، نشأة النّجوم، والمسافات

1. (I) استعمل تعريف كلّ من الفرسخ والسنة الضوئية لتبين أنّ 1 فرسخ = 3.26 سنة ضوئية.

2. (I) إذا أظهر نجم تغيرًا ظاهريًّا في موقعه يبلغ 0.38 ثانية من القوس، فكم بعده؟

3. (I) تبلغ زاوية التغير الظاهري في موقع نجم 0.00019^{o}. كم بعد هذا النّجم؟

4. (I) يبعد نجم مسافة 36 فرسخا. ما زاوية التغير الظاهري في موقع النّجم؟ عبر عن ذلك بـ: (أ) الثواني من القوس. (ب) الزوايا.

5. (I) ما زاوية التغير الظاهري في موقع نجم يبعد 55 سنة ضوئية؟ كم فرسخًا في هذه المسافة.

6. (I) إذا كان بعد نجم عنا يساوي ضعف ذاك الذي لنجم آخر، فهل زاوية التغير الظاهري في موقع النّجم البعيد أكبر من تلك التي للنجم الأقرب أم أقلّ ؟ بأيّ معامل؟

7. (I) يبعد نجم مسافة 35 فرسخًا. كم الوقت الذي يحتاج إليه الضَّوء الصادر عن هذا النّجم حتى يصل إلينا؟

8. (II) رأينا سابقًا (الفصل 14) أنّ معدل الطاقة الذي يصل الأرض من الشّمس ("الثابت الشّمسي") يساوي نحو $1.3 \times 10^{3}\ W/m^{3}$.

(أ) ما البريق الظاهريّ (l) للشّمس؟

(ب) ما السّطوع المطلق (L) للشّمس؟

9. (II) ما البريق النسبيّ للشّمس كما ترى من المشتري مقارنة مع بريقها من الأرض؟ (يبعد المشتري عن الشّمس 5.2 مرة من بعد الأرض عنها).

10. (II) قدّر العرض الزاوي الذي تحصره مجرتنا إذا تمت مراقبتها من أقرب المجرات إلينا (الجدول 33 – 1). قارن العرض الزاوي للقمر عند مشاهدته من الأرض.

11. (II) عندما تصبح الشّمس عملاقًا أحمر، فكم سيكون متوسط كثافتها إذا تمددت إلى مدار الأرض ($1.5 \times 10^{11}m$ من الشّمس)؟

12. (II) عندما تصبح الشّمس قزمًا أبيض، يتوقع أن يكون حجمها مساويًا لحجم القمر. ما العرض الزاوي الذي تحصره من بعدها الحالي عن الأرض؟

13. (II) احسب كثافة قزم أبيض كتلته مساوية لكتلة الشّمس، ونصف قطره مساو لنصف قطر الأرض. بكم مرة أكبر هذه الكثافة من تلك التي للأرض؟

14. (II) نجم نيوتروني كتلته 1.5 كتلة الشّمس، ونصف قطره 11 km. احسب متوسط كثافته، وقارنها مع تلك التي للقزم الأبيض (المسألة 13) ومع تلك التي للمادة النّوويّة.

15. (II) احسب قيم Q لتفاعلات حرق He في (المعادلة 33 – 2). (كتلة غير المستقر جدًّا $^{8}_{4}Be$ تساوي 8.005305u)

16. (II) افرض أنّ نجمين لهما البريق الظاهري(l) نفسه، ويعتقد أيضًا أنّ لهما الحجم ذاته. يحتوي طيف أحدهما على قمم عند 800 nm في حين أنّ طيف الآخر يحتوي على قمم عند 400 nm. استعمل قانون فين (البند 27 – 2) ومعادلة ستيفان – بولتزمان (المعادلة 14 – 5) لتقدير بعديهما النسبيّ عن الأرض [مساعدة: انظر المثالين 33 – 4، و 33 – 5].

17. (III) هناك نجوم موجودة في تجمع معين يفترض أنها تقع على البعد نفسه عن الأرض. يظهر طيفا نجمين منهما قمة عن $\lambda_1 = 500$، وعند $\lambda_2 = 700$ nm، ونسبة البريق الظاهري لهما $l_1/l_2 = 0.091$ قدر حجميهما النسبيين (أعط النسبة بين قطريهما). [مساعدة: استعمل معادلة ستيفان – بولتزمان، معادلة 14 – 5].

33 – 4 النسبية العامة، الجاذبيّة وانحناء الفضاء

18. (I) بين أنّ نصف قطر شوارزشيلد لنجم كتلته تساوي (أ) كتلة الشّمس هو 2.95 km. (ب) كتلة الأرض 8.9mm.

19. (II) ما نصف قطر شوارزشيلد لمجرة اعتيادية (كمجرتنا)؟

20. (II) صف مثلثًا رسم على سطح كرة مجموع زواياه: (أ) °359. (ب) °180.

21. (II) ما أقصى مجموع لزوايا مثلث رسم على كرة؟

33 – 5 الإزاحة الحمراء، قانون هبل

22. (I) إذا تحركت مجرة مبتعدة عنا بسرعة تساوي 1.0% من سرعة الضّوء، فكم تبعد عنا هذه المجرة تقريبًا؟

23. (I) تشير الإزاحة الحمراء لمجرة إلى السرعة 3500 km/s. كم تبعد هذه المجرة؟

24. (I) قَدِّرْ سرعة مجرة (بالنسبة إلينا) تقع بالقرب من الحدّ الذي يمكن مشاهدته من الكون، افترض مسافة تقدر بـ 12 مليار سنة ضوئية.

25. (II) قَدِّرْ الطول الموجي للخط 656 الذي يشاهد في سلسلة بالمر للهيدروجين في طيف مجرة تبعد عنا: (أ) 1.0×10^{6} سنة ضوئية. (ب) 1.0×10^{8} سنة ضوئية. (ج) 1.0×10^{10} سنة ضوئية.

26. (II) قدر سرعة مجرة، والمسافة التي تبعدها عنّا، إذا علم أنّ الطول الموجي لخط الهيدروجين عند 434 nm تم قياسه على الأرض فكان 610 nm.

27. (II) ما سرعة مجرة عندما يكون لها $z = 0.60$؟

28. (II) كم يجب أن يكون معامل الإزاحة الحمراء z لمجرة تتحرك بعيدًا عن الأرض بسرعة $\upsilon = 0.5\ c$؟

29. (II) ابدأ من (المعادلة 33 – 3) لتبين أنّ إزاحة دوبلر للطول الموجي تساوي $\Delta\lambda/\lambda_0 \approx v/c$ (معادلة 33 – 5 ب) عندما $v \ll c$. [مساعدة: استعمل نظرية ذات الحدين].

33 – 6 إلى 33 – 8 الانفجار العظيم، CMB، تمدد الكون

30. (I) استعمل قانون فين لحساب الطول الموجي عند قمة التوزيع الإشعاعي للجسم الأسود عند درجة الحرارة 2.7K.

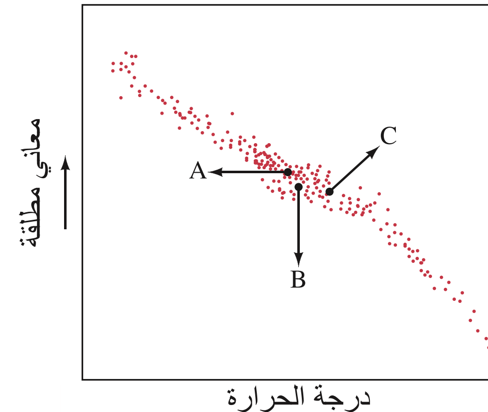
31. (II) كي يكون الكون مقفلا؛ يجب أن تساوي الكثافة الحرجة ρ_c $\approx 10^{-26}$ kg/ m^3. عبر عن ρ_c بدلالة متوسط عدد النيوكليونات لكلّ متر مكعب.

32. (II) يعتقد أنّ مقياس الكون (متوسط المسافة بين المجرات) عند أيّ لحظة كان يتناسب عكسيًّا مع درجة الحرارة المطلقة. قدر حجم الكون مقارنة بحجمه الحالي، عند: (أ) $t = 10^{6}$ سنة ضوئية. (ب) $t = 1s$. (ج) $t = 10^{-6}$ s. (د) $t = 10^{-35}$ s.

33. (II) على نحو تقريبيّ، حدّد الزّمن الذي برد فيه الكون إلى أقلّ من درجة حرارة العتبة اللازمة لإنتاج:
(أ) كيونات $(M \approx 500\ MeV/\ c^2)$.
(ب) $Y (M \approx 9500\ MeV/\ c^2)$.
(ج) ميونات $(M \approx 100\ MeV/\ c^2)$.

مسائل عامة

34. افرض أنّ ثلاثة من نجوم التسلسل الأساسي يمكن أن يحدث لها التغيرات الثلاثة التي تمثل بثلاثة أسهم؛ أ، ب، ج في المخطط البياني H – R الموضح في (الشّكل 33 – 28). صفِ التغيراتِ في درجة الحرارة، السّطوع والحجم لكلّ حالة.



الشكل 33 - 28 (مسألة 34)

35. افرض أنّ السّطوع المطلق الذي لأقرب النّجوم يساوي ذلك الذي للشّمس تقريبًا. وعلى أيّ حال، فإنّ البريق الظاهري لهذه النّجوم أقلّ من ذلك الذي للشمس بنحو 1011 مرة. من هذه المعلومات، قدّر المسافة لهذه النّجوم القريبة. (قام نيوتن بإجراء هذه الحسابات، على الرغم من أنه ارتكب خطأ حسابيًّا بمعامل من 100).

36. استعمل حفظ كمية التحرك الزاوية لتقدير السرعة الزاوية لنجم نيوتروني (قطره 20 km) نجم عن انهيار نجم كان نصف قطره مساويا لنصف قطر الشمس $(7 \times 10^{8}\ m)$، وكتلته أكبر من كتلة الشّمس بنحو 1.5 مرة، ويدور مرة كلّ شهر تقريبًا كالشمس.

37. ما العامل الذي تتغير فيه طاقة الحركة الدورانية للنجم الوارد في(المسألة 36)عندما ينهار إلى نجم نيوتروني؟

38. يعتقد أنّ نجما نابضا معينا كان نجما نيوترونيا كتلته أكبر من تلك التي للشمس بنحو 1.5 مرة، وقطره 20 km. لوحظ أنّ سرعته الدورانية 1 دورة/ ثانية. فإذا فقد طاقة حركية دورانية بمعدل جزء من 10^{9} لكلّ يوم، والتي تتحول إلى إشعاعات، فما القدرة الصادرة عن هذا النّجم؟

.39 تبعد أقرب مجرة كبيرة عن مجرتنا 2×10^6 kg سنة ضوئية تقريبا. إذا كانت كتلة كلّ منهما 3×10^{41} kg ، فما قوة الجاذبيّة التي تؤثر بها كلّ مجرة في الأخرى؟

.40 قدر كتلة سكون النيوترينو (بوحدة eV) الذي تقدمه الكثافة الحرجة لإغلاق الكون. افرض أنّ كثافة النيوترينو مثل الفوتونات، أكبر بنحو 10^9 مرة من تلك التي للنيوكليونات، وأنّ النيوكليونات تشكل فقط: (أ) 2% من الكتلة اللازمة. (ب) 5% من الكتلة اللازمة.

.41 نجمان، أحدهما يظهر في طيفه قمة عند 600 nm، والآخر عند 400 nm، ويقع كلّ منهما على خط التسلسل الأساسي. استعمل قانون فين، ومعادلة ستيفان بولتزمان، والمخطط البياني H – R (الشّكل 33 – 6) لتقدير النسبة بين قطريهما [مساعدة: انظر المثالين 33 – 4، و 33 – 5].

.42 افرض أنّه يمكننا قياس مسافات مع اختلاف مطلع في موقع نجم عند 100 فرسخ. ما الحدّ الأدنى لتحليلنا الزاوي (بالدرجات) بناء على هذه المعلومات؟

.43 في أثناء تطابق ما، حدث أنْ تركبت خطوط بالمر من هيليوم أحادي التأين في نجم بعيد مع خطوط بالمر من الهيدروجين في الشّمس (الشّكل 27 – 22). ما السرعة التي يبتعد بها النّجم عنا؟

.44 ما درجة الحرارة المناظرة للتصادمات التي طاقتها 1.8TeV في مصادم مختبر فيرمي؟ ما الحقبة الزمنية من التاريخ الكوني التي تناظر ذلك؟ [مساعدة: انظر الشّكل 33 – 25].

.45 قام علماء الفلك حديثًا بقياس دوران سحابة غازية حول ما يعتقد أنّه ثقب أسود عملاق كتلته أكبر من الكتلة الشّمسية بنحو مليارين، ويقع عند مركز المجرة. إذا كان نصف القطر من مركز المجرة إلى السحابة الغازية 60 سنة ضوئية تقريبا، فما إزاحة دوبلر $\Delta\lambda/\lambda_0$ التي شاهدوها؟

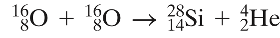
.46 تتحرك مجرة بعيدًا عن الأرض. ينبعث من المجرة خط الهيدروجين الأزرق عند 434 nm، ولكن قياسه على الأرض كان عند 650 nm. (أ) ما السرعة التي تتحرك بها المجرة؟ (ب) كم تبعد المجرة عن الأرض؟

.47 في المراحل الأخيرة من نشأة نجم، بدا النّجم (إذا كان ثقيلا بما فيه الكفاية) بدمج أنوية الكربون ليتشكل، على سبيل المثال، المغنيسيوم:

$$^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{24}_{12}Mg + \gamma$$

(أ) كم كمية الطاقة التي تتحرر في هذا التفاعل (انظر الفهرس ب) (ب) كم الطاقة الحركية التي يجب أن تكون لكلّ نواة كربون (افترض أنهما متساويتان) في تصادم مباشر حتى يتلامسا فقط (استعمل المعادلة 30 – 1) بحيث تبدأ القوة القوية بالعمل؟ (ج) ما درجة الحرارة التي تناظر هذه الطاقة الحركية؟

.48 افترض التفاعل التالي:



$$^{16}_{8}O + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{28}_{14}Si + ^{4}_{2}He$$

وأجب عن الأسئلة الواردة في (المسألة 47) نفسها.

.49 كم سيكون حجم الشّمس إذا كانت كثافتها مساوية للكثافة الحرجة التي للكون $\rho_c \approx 10^{-26}\ kg/m^3$؟ عبر عن إجابتك بدلالة السنة الضوئية وقارنها مع المسافة بين الأرض والشّمس، وكذلك مع حجم مجرتنا.

إجابات التمارين

(أ) أنفسنا؛ قبل سنتين.

(ب) 600 سنة ضوئية (قدر L من الشّكل 33 – 6 ليكون $L \approx 8 \times 10^{26}$ W؛ لاحظ أنّ 6000 K على المقياس اللوغاريتمي تكون أقرب إلى 7000 K منه إلى 5000 K).

(ج) 1.4

ملحق أ
مراجعة رياضية

أ-1 علاقات، وتناسب، ومعادلات

يكمن أحد الأمور الفيزيائية المهمّة في البحث عن العلاقات بين الكميات المختلفة؛ أي تحديد كيفية تأثير إحدى الكميات في أخرى. ومثال ذلك، كيفية تأثير درجة الحرارة في ضغط هواء عجل السيارة، أو كيفية تأثير القوة المحصلة في تسارع جسم ما. وفي بعض الأوقات، تتأثر كميّة ما بكميتين أو أكثر؛ كارتباط تسارع جسم ما بكتلته والقوة المؤثرة فيه. وإذا شكّكت بوجود علاقة بين كميتين أو أكثر، فتستطيع عندئذ محاولة تحديد طبيعة هذه العلاقة بدقة. ويتم هذا عن طريق تغيير إحدى الكميّات وقياس كيفية تغير الكميّات الأخرى تبعاً لذلك. وإذا كانت هناك احتمالية تأثر إحدى الكميّات بأكثر من معامل أو كمية، فيتم تغيير كمية واحدة في كلِّ مرّة، في حين تترك الكميّات الأخرى ثابتة.*

وكمثال بسيط، وجد القدماء أنّه إذا كان قطر دائرة ما ضعف قطر دائرة ثانية، فإنّ محيط الأولى سيعادل ضعف محيط الثانية أيضًا. وإذا كان نصف القطر أكبر من سابقه بثلاثة أضعافٍ، فإن المحيط سيكون أكبر بثلاثة أضعاف أيضًا. أي أنّ ازدياد القطر ينجم عنه ازدياد يتناسب مع ذلك في المحيط. وعندئذ نقول إنّ المحيط يتناسب طرديًّا مع القطر. ويمكن كتابة ذلك بدلالة الرموز كما يلي: $C \propto D$، حيث تعني "$\propto$" : «متناسبة مع». ويشير كل من C و D إلى محيط دائرةٍ ما وقطرها، على الترتيب. وتكون الخطوة التالية تغيير هذا التناسب إلى معادلة لتجعل إمكانية ربط الكميتين رقميًّا أمرًا ممكنًا. ويستلزم هذا إضافة ثابت تناسب تحدد قيمته تجريبيًّا في حالات عديدة (وفي حالاتٍ أخرى، يمكن اختياره عشوائيًّا، خاصة عندما يُعرِّف وحدة جديدة). لقد وجد القدماء أن نسبة محيط الدائرة إلى قطرها تعادل العدد 3.1416 (عند استخدام عدد قليل من الخانات بعد الفاصلة). ورمز لهذا العدد بالحرف اللاتيني π. وهو ثابت التناسب في العلاقة $C \propto D$. وللحصول على معادلة، ندخل π في التناسب، ونضع π مكان $\propto$. وعليه، تصبح $C = \pi D$.

تناسب طردي

وتحدث كذلك حالات أخرى للتناسب. فعلى سبيل المثال، إذا تضاعف نصف القطر، فستصبح المساحة أكبر بمقدار أربعة أضعاف؛ وهكذا. وفي هذه الحالة، نستطيع أن نكتب $A \propto r^2$، حيث تُمثل كل من A و r مساحة الدائرة ونصف قطرها على الترتيب.

تناسب عكسي

وفي بعض الأحيان، ترتبط كميتان ببعضهما بطريقة ما بحيث تؤدي الزيادة في قيمة إحداهما إلى تناقص طردي في الأخرى. ويدعى هذا تناسبًا عكسيًّا. ومثال ذلك، الزمن اللازم لقطع مسافة ما يتناسب عكسيًّا مع السرعة المستخدمة خلال قطع المسافة نفسها. وكلما ازدادت السرعة، أصبح الوقت المستغرق أقل. ونستطيع أن نعّبر عن هذه العلاقة العكسية كما يلي: الزمن $\propto \frac{1}{\text{السرعة}}$.

وكلّما ازداد مقام الكسر، نقصت قيمته ككل. وعلى سبيل المثال، فإن $\frac{1}{4}$ أقل من $\frac{1}{2}$. وعليه، إذا تضاعفت السرعة، نقص الزمن إلى النصف، وهو ما نريد التعبير عنه بعلاقة التناسب العكسي.

* عندما تؤثر كمية ما في أخرى، فإننا نستخدم عبارة «دالة في أو اقتران» للدلالة على هذا الاعتماد ؛ فنقول: إن الضغط داخل عجل السيارة هو دالة في درجة الحرارة.

أيُّ تناسب صحيح، يمكن تغييره إلى معادلة بعد إضافة ثابت تناسب ملائم. وعندئذٍ يمكن التنبُّؤ أو استخدام عبارات كمية لوصف العالم الفيزيائي بدلالة هذه المعادلة.

أ-2 الأُسس

عندما نكتب 10^4 ، فإننا نعني أن 10 ستضرب في نفسها أربع مراتٍ: $10^4 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10{,}000$. يُدعى الرمز العلوي 4 الأس. ويُقال إن 10 قد رفعت إلى القوة الرابعة. وأي عدد أو رمز يمكن أن يرفع إلى قوة ما. كما وتستخدم مُسميات خاصة عندما يكون الأس 2 (a^2 هي "a مربعة") أو3 (a^3 هي "a مكعبة"). ولأي أسٍّ آخر، فإننا نقول عن an "a مرفوعة إلى القوة n". أما إذا كان الأسّ 1، فإنه لا يذكر في الأغلب: $a^1 = a$، لعدم الحاجة إلى الضرب. ويُعَبّرُ عن القواعد المتبعة في ضرب الأعداد المرفوعة إلى قوة كالتالي:

$$(a^n)(a^m) = a^{n+m} \qquad (1-أ)$$

أي أن الأسس تُجمع. ولكي نرى لماذا تمّ ذلك، نأخذ في الحسبان نتيجة ضرب 3^3 في 3^4 :

$$(3^3)(3^4) = (3)(3)(3) \times (3)(3)(3)(3) = (3)^7$$

وهنا يكون جمع الأسس هو $3 + 4 = 7$، و بذلك تتحقق قاعدة أ $- 1$. ولاحظ أنَّ هذه القاعدة تنطبق عندما تكون الأعداد الأساسية متشابهة (a في المعادلة أ $- 1$). وعليه، فلن نستطيع استخدام قاعدة جمع الأسس هذه لـ $(5^2)(6^3)$؛ ويجب تحليل هذه الأرقام للوصول إلى الإجابة. ومع هذا، نستطيع كتابة قاعدة أخرى في حالة تشابه الأسس واختلاف الأعداد الأساسية:

$$(a^n)(b^n) = (ab)^n \qquad (2-أ)$$

على سبيل المثال، $(5^3)(6^3) = (30)^3$ لأن

$$(5)(5)(5)(6)(6)(6) = (30)(30)(30)$$

وتتضمَّن القاعدة الثالثة أس مرفوع إلى قوة أخرى: $(a^3)^2$ تعني (a^3) (a^3)، وهي تساوي $a^{3+3}=a^6$.
لذا، تكون القاعدة العامة هي

$$(a^n)^m = a^{nm} \qquad (3-أ)$$

وفي هذه الحالة ، تضرب الأسس في بعضها.
تستخدم الأسس السالبة للأعداد المقلوبة. ولهذا

$$\frac{1}{a} = a^{-1}, \qquad \frac{1}{a^3} = a^{-3}$$

وهكذا دواليك. إنّ السبب في استخدامنا للأسس السالبة يُعزى إلى التمكّن من استخدام قواعد الضرب المبينة في الأعلى. فعلى سبيل المثال، $(a^5)(a^{-3})$ تعني

$$\frac{(a)(a)(a)(a)(a)}{(a)(a)(a)} = a^2$$

وتعطي (القاعدة أ $- 1$) النتيجة ذاتها:

$$(a^5)(a^{-3}) = a^{5-3} = a^2$$

ماذا يعني الأُسّ الصفري؟ أي، ما معنى a^o؟ يعرّف أي رقم مرفوع إلى الأس الصفري على أنّه يساوي 1 :

$$a^0 = 1.$$

ويستخدم هذا التعريف لأنّه ينتج من قواعد جمع الأسس.
وكمثال على ذلك،

$$a^3a^{-3} = a^{3-3} = a^0 = 1$$

ولكن هل فعليًّا $a^3\ a^{-3}$ تساوي 1؟ والجواب على ذلك نعم؛ لأنّ

$$a^3a^{-3} = \frac{a^3}{a^3} = 1$$

تستخدم الأسس الكسرية لتمثل الجذور. فعلى سبيل المثال، تعني $a^{\frac{1}{2}}$ جذر a التربيعي؛ أي أن $a^{\frac{1}{2}} = \sqrt{a}$. وبالمثل ، $a^{\frac{1}{3}}$ تعني جذره التكعيبي، وهكذا دواليك.

جذر a الرابع يعني أنه عند ضرب جذر a الرابع في نفسه أربع مراتٍ، ستحصل مرة أخرى على a:

$$(a^{\frac{1}{4}})^4 = a$$

وهذا متطابق مع (القاعدة أ – 3) لأن $(a^{\frac{1}{4}})^4 = a^{\frac{4}{4}} = a^1 = a$.

أ-3 الرفع إلى القوة 10، أو المصطلح الأسي

إنّ كتابة أعداد كبيرة جدّا أو صغيرة جدّا كبعد كوكب نبتون عن الشمس، 4.500.000.000 km، أو كقطر ذرة اعتيادية، 0.00000001 cm، هو أمر غير مريح وعرضة للخطأ. كما أنّه يترك تساؤلا (انظر البند 1 – 4) عن عدد الأرقام المميزة. كم من الأصفار يعد مميزًا في العدد (4.500.000.000 km ?) ولذلك فنحن نستخدم ''إلى القوة 10'' أو المصطلح الأسي. وعليه، يصاغ البعد من نبتون إلى الشمس كالتالي: 4.50×10^9 km (على افتراض أن القيمة مميزة حتى ثلاث خانات). وقطر الذرة 1.0×10^{-8} cm. وتعتمد طريقة الكتابة هذه على استخدام الأسس، حيث a^n تعني أن a مضروبة في نفسها n مرة. وعلى سبيل المثال، $10{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4$. لذا، فإن الأس (9 في هذه الحالة) هو فقط عدد الخانات التي ستتحركها الفاصلة إلى اليمين للحصول على الرقم مكتوبا بالكامل وعند ضرب عددين (أو قسمتهما)، تضرب أولا (أو تقسم) الأجزاء البسيطة ثم تتبعها بـِ الأرقام المرفوعة إلى القوة 10. لذا، 2.0×10^3 مضروبة في 5.5×10^4 يساوي $(2.0 \times 5.5) \times (10^3 \times 10^4) = 11 \times 10^7$ حيث استخدمنا قاعدة جمع الأسس (الفهرس أ – 2). وبالمثل، 8.2×10^5 مقسومة على 2.0×10^2 تساوي

$$\frac{8.2 \times 10^5}{2.0 \times 10^2} = \frac{8.2}{2.0} \times \frac{10^5}{10^2} = 4.1 \times 10^3$$

وللأرقام الأقل من 1 مثل 0.01، يكتب أسّ القوة 10 مع إشارة سالبة:

$0.01 = 1/100 = 1/10^2 = 1 \times 10^{-2}$. وبالمثل، $0.002 = 2 \times 10^{-3}$. حيث تم تحريك الفاصلة العشرية مرة أخرى بعدد الخانات المذكورة في الأسّ. ولذلك، $0.020 \times 3600 = 72$؛ ووفق المصطلح الأسي $72 = 7.2 \times 10^1 = (2.0 \times 10^{-2}) \times (3.6 \times 10^3)$.

لاحظ أيضاً أن $1 = 10 \times 0.1 = 10^1 \times 10^{-1}$، وأن قانون الأس $10^1 \times 10^{-1} = 10^0$ وعليه، $10^0 = 1$.

وعند كتابة عدد ما بدلالة المصطلح الأسي، فإن من العادة أن يكون العدد البسيط بين 1 و 10. لذا من المتعارف عليه أن تكتب 4.5×10^9 بدلًا من 45×10^8، بالرغم من كونهما العدد نفسه.* كما يسمح هذا المصطلح التعبير عن الأرقام المميزة بوضوح. ونكتب 4.5×10^9 إذا كان هذا العدد دقيقا إلى ثلاثة أرقام مميزة، في حين 4.5×10^9 إذا كانت دقته تصل إلى رقمين مميزين فقط.

أ-4 الجبر الخطي

يمكن تمثيل العلاقات الفيزيائية بين الكميات كمعادلات تحتوي على رموز (عادة أحرف أبجدية) تمثل هذه الكميات. إنّ استخدام هذه المعادلات يشكل مجال الجبر الخطي المستخدم بشكل واسع في الفيزياء. وتتضمن المعادلة إشارة مساواة، وهي تشير إلى أنّ الكميتين على جانبي الإشارة لهما القيمة نفسها. وكأمثلة على هذه المعادلات

$$3 + 8 = 11$$
$$2x + 7 = 15$$
$$a^2b + c = 6$$

تتضمن المعادلة الأولى أرقاماً فقط. لذا، فهي تدعى معادلة رياضية. وتدعى المعادلتان الأخيرتان جبريتين لاحتوائهما على رموز. وتعني الكمية a^2b، في المعادلة الثالثة أن a مضروبة في a في b: $a^2b = a \times a \times b$.

* اتفاق آخر مستخدم، خاصة في الحواسيب، أن الرقم البسيط هو ذلك الذي بين 0.1 و 1. لذا، نستطيع كتابة 4,500,000,000 كالتالي: 0.450×10^{10}.

الحل لإيجاد مجهول

غالبًا ما نرغب في الحلّ لإيجاد رمز (أو أكثر)، ونتعامل معه كمجهول. فعلى سبيل المثال، في المعادلة: $2x + 7 = 15$ فإنّ المجهول هو x؛ وهذه المعادلة صحيحة، فقط عندما $x = 4$. إنّ تحديد قيمة (أو قيم) المجهول (أو المجاهيل) مع ضرورة تحقيق المعادلة (أو المعادلات) يدعى حل المعادلة، وعند حل المعادلة، يمكن استخدام القاعدة التالية :

ستبقى المعادلة صحيحة بعد تطبيق أي عملية على أحد جانبيها إذا طبقت العملية نفسها على جانبها الآخر أيضًا: فعلى سبيل المثال: (أ) جمع أو طرح عدد أو رمز ؛ (ب) الضرب في أو القسمة على عدد أو رمز ؛ (جـ) رفع كل جانب من المعادلة إلى القوة نفسها، أو أخذ الجذر نفسه (كالجذر التربيعي).

مثال أ - 1 **حل لإيجاد x في المعادلة**

$$2x + 7 = 15$$

النهج : نجري العمليتين نفسيهما على جانبي المعادلة كي نعزل x لتكون المجهول الوحيد على الجانب الأيمن لإشارة المساواة.

الحل : نطرح أولا 7 من الجانبين :

$$2x + 7 - 7 = 15 - 7$$

$$2x = 8$$

ثم نقسم الجانبين على 2 لنحصل على

$$\frac{2x}{2} = \frac{8}{2}$$

أو، بتنفيذ القسمة .

$$x = 4$$

وهذا يحل المعادلة.

مثال أ - 2 (أ) **حل المعادلة**

$$a^2b + c = 24$$

لإيجاد المجهول a بدلالة كل من b و c . (ب) حل لإيجاد a على افتراض أن $b = 2$ و $c = 6$.

النهج : نجري عمليات لعزل a كمتغير وحيد على يمين إشارة التساوي.

الحل : (أ) سنحاول أن نحل لإيجاد a. لذا، نطرح أولا c من الجانبين

$$a^2b = 24 - c$$

ثم نقسم على b

$$a^2 = \frac{24 - c}{b}$$

وأخيرًا نأخذ الجذر التربيعي

$$a = \sqrt{\frac{24 - c}{b}}$$

(ب) إذا أعطينا $b = 2$ و $c = 6$، فعندئذ

$$a = \sqrt{\frac{24 - 6}{2}} = 3$$

ملحوظة : في أي وقت نحسب الجذر التربيعي، يمكن للرقم أن يكون موجبا أو سالبا. لذا، $a = -3$ هي حلٌّ أيضًا. لماذا؟ السبب هو أن $(-3)^2 = 9$، تماما مثل $(+3)^2 = 9$. ولهذا، فإنّنا نحصل بالفعل على حلّين هما: $a = +3$ و $a = -3$.

ولاختبار حلّ ما، نعوض في المعادلة الأصلية (وهذا اختبار فعلي للتأكّد من أن استخداماتنا صحيحة جميعها). ففي المعادلة

$$a^2b + c = 24$$

نعوض فيها $a = 3$ ، و $b = 2$ ، $c=6$ لنجد أن

$$(3)^2(2) + (6) \stackrel{?}{=} 24$$
$$24 = 24$$

وهي الإجابة الصحيحة.

التمرين أ : ضع $a = -3$ في المعادلة في (المثال أ -2) . وأثبت إمكانية ذلك.

مجهولان أو أكثر

إذا كان لدينا مجهولان أو أكثر، فإنّ معادلة واحدة لن تكون كافية لتحديد هذه المجاهيل . وبشكل عام، إذا كان هناك n من المجاهيل، فإننا بحاجة إلى n من المعادلات المستقلة. فعلى سبيل المثال، إذا كان هناك مجهولان، فإننا بحاجة إلى معادلتين. وإذا دُعي المجهولان x و y ؛ فإن من الإجراءات المعتادة أن نُحل معادلة واحدة لإيجاد x بدلالة y، ثم تعوض النتيجة في المعادلة الثانية.

مثال أ - 3 حل المعادلتين التاليتين لإيجاد كل من x و y.

$$3x - 2y = 19$$
$$x + 4y = -3$$

النهج : لدينا مجهولان ومعادلتان ؛ نستطيع أن نبدأ عن طريق حل المعادلة الثانية لإيجاد x بدلالة y. ثم نعوض نتيجة x هذه في المعادلة الأولى.

الحل : نطرح $4y$ من طرفي المعادلة الثانية :

$$x = -3 - 4y$$

ثم نعوض هذه الصيغة لإيجاد x في المعادلة الأولى . ونبسط

$$(-3 - 4y) - 2y = 19$$

$$-9 - 12y - 2y = 19 \quad \text{(تم الضرب في 3)}$$

$$-14y = 28 \quad \text{(تم إضافة 9 إلى الجانبين)}$$

$$y = -2 \quad \text{(قسم الطرفان على 14-)}$$

والآن بعد أن عرفنا أن $y = -2$ ، نعوض ذلك في الصيغة لإيجاد x

$$x = -3 - 4y$$
$$= -3 - 4(-2) = -3 + 8 = 5$$

حلنا هو $x = 5$ ، و $y = -2$. ونختبر هذا الحل بتعويض هذه القيم مرة أخرى في المعادلتين الأصليتين

$$3x - 2y \stackrel{?}{=} 19$$
$$3(5) - 2(-2) \stackrel{?}{=} 19$$
$$15 + 4 \stackrel{?}{=} 19$$
$$19 \stackrel{?}{=} 19 \quad \text{(حل صحيح)}$$

وأيضاً

$$x + 4y \stackrel{?}{=} -3$$
$$5 + 4(-2) \stackrel{?}{=} -3$$
$$-3 \stackrel{?}{=} -3 \quad \text{(حل صحيح)}$$

يمكن إيجاد طرق أخرى لحل معادلتين معًا أو أكثر، كطريقة إيجاد المحددات المستخدمة في كتب الجبر الخطي.

الصيغة التربيعية

نواجه في بعض الأحيان معادلات تحتوي على مجهول، لنقل x، حيث يظهر مربع في المعادلة إضافة إلى أنّه مرفوع إلى القوة الأولى. ويمكن كتابة هذه المعادلة التربيعية على النحو التالي:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

وتكون الكميات a، و b، و c عادة أعدادًا أو ثوابت معطاة.* والحلان العامان لمعادلة من هذا النوع يعطيان بالصيغة التربيعية التالية:

الصيغة التربيعية

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad \text{(أ – 4)}$$

توحي الإشارتان ± أن هناك حلين لـ x: يظهر أحدهما عند استخدام إشارة الموجب، والآخر عند استخدام الإشارة السالبة.

مثال أ - 4 أوجد الحلين لـ x في المعادلة

$$3x^2 - 5x = 2$$

النهج: تظهر x هنا مرفوعة لكلٍّ من القوتين الأولى و الثانية (تربيع). لذلك، سنستخدم المعادلة التربيعية.

الحل: نكتب أولا هذه المعادلة بالصيغة التربيعية

$$ax^2 + bx + c = 0$$

وبطرح 2 من كلا الطرفين

$$3x^2 - 5x - 2 = 0$$

وفي هذه الحالة تأخذ a، و b، و c في الصيغة النموذجية القيم التالية: $a = 3$، و $b = -5$، و $c = -2$. ويصبح الحلان لـ x كما يلي:

$$x = \frac{+5 + \sqrt{25 - (4)(3)(-2)}}{(2)(3)} = \frac{5+7}{6} = 2$$

و

$$x = \frac{+5 - \sqrt{25 - (4)(3)(-2)}}{(2)(3)} = \frac{5-7}{6} = -\frac{1}{3}$$

ويكون الحلان في هذا المثال كالتالي: $x = 2$ و $x = -\frac{1}{3}$. وفي مسائل الفيزياء، قد يحصل أن أحد الحلين فقط يمثل حالة حقيقية عملية؛ وفي هذه الحالة يهمل الحل الآخر. وفي حالات أخرى، قد يرتبط الحلان بالواقع الفيزيائي.

لاحظ، مصادفة هنا، أن b^2 يجب أن تكون أكبر من $4ac$، بحيث إن $\sqrt{b^2 - 4ac}$ تفضي إلى عدد حقيقي. أما إذا كان $(b^2 - 4ac)$ أصغر من الصفر (سالب)، فلن يكون هناك حلّ حقيقيّ. ويدعى الجذر التربيعي للعدد السالب بالتخايلي.

تمتلك المعادلة من الدرجة الثانية حلّين عندما يكون أعلى قوة فيها 2. أما المعادلة من الدرجة الثالثة المحتوية على x^3 فتمتلك ثلاثة حلول. وهكذا دواليك.

أ–5 الممتدة ثنائية الحدود

تواجهنا في بعض الأوقات كمية صيغتها $(1 + x)^n$. أي الكمية $(1 + x)$ مرفوعة إلى الأس n. ويمكن كتابتها كجمع غير منته من الحدود، يعرف كمتتالية ممتدة، كالتالي:

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \cdots \quad \text{(أ – 5)}$$

وهذه الصيغة مفيدة لنا بشكل رئيس عندما تكون x صغيرة جدّا مقارنة مع الواحد $(x \ll 1)$. وفي هذه الحالة، يكون كلّ حدّ تالٍ أصغر بكثير من سابقه.

* أو حدّ واحد أو أكثر منهم يمكن أن يكون متغيرا، وفي هذه الحالة سنحتاج إلى معادلات إضافية.

وعلى سبيل المثال، إذا كان $x = 0.01$، و $n = 2$، فسنقول، إذا كان الحد الأول يساوي 1، فإن الحد الثاني هو $nx = (2)(0.01) = 0.02$، ويكون الحد الثالث $[(2)(1)/2](0.01)^2 = 0.0001$، وهكذا دواليك .
ولهذا، عندما تكون x صغيرة، نستطيع إهمال الحدود جميعها عدا أول حدين (أو ثلاثة). ونستطيع كتابة

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx. \qquad \text{(6 – أ)}$$

ويسمح لنا هذا التقريب غالبا بحل المعادلة بسهولة، وبدونه قد يكون الحل صعبا جدّا.

$$(1 + x)^2 \approx 1 + 2x$$

$$\frac{1}{1 + x} = (1 + x)^{-1} \approx 1 - x$$

$$\sqrt{1 + x} = (1 + x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \tfrac{1}{2}x$$

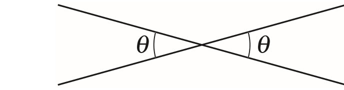
$$\frac{1}{\sqrt{1 + x}} = (1 + x)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 - \tfrac{1}{2}x$$

حيث $x \ll 1$.
وكمثال رقمي، دعنا نقيم $\sqrt{1.02}$ باستخدام المتمددة الثناحدية. بسبب أن $x = 0.02$ وهي أصغر بكثير من 1 :

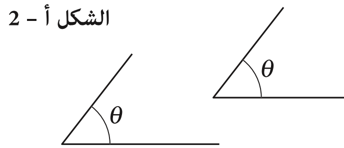
$$\sqrt{1.02} = (1.02)^{\frac{1}{2}} = (1 + 0.02)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \tfrac{1}{2}(0.02) = 1.01.$$

وتستطيع أن تختبر هذا بوساطة الآلة الحاسبة (وربما ليس بسرعة أكبر من ذلك) حيث $\sqrt{1.02} \approx 1.01$

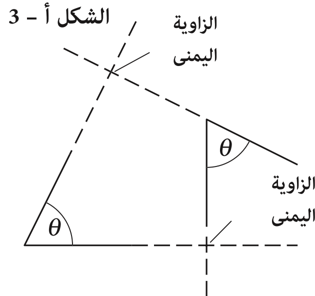
أ–6 علم الهندسة السطحية



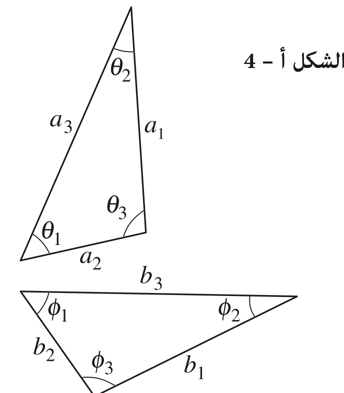
الشكل أ – 1



الشكل أ – 2



الشكل أ – 3



الشكل أ – 4

نراجع هنا عددا من النظريات المفيدة في الفيزياء والمتضمنة زوايا ومثلثات.
الزوايا المتساوية.

1. تتساوى زاويتان إذا كان أيّ من الظروف التالية صحيحا، إذا:
(أ) كانتا زاويتين رأسيتين (الشكل أ – 1) ؛ أو
(ب) كان الجانب الأيسر لإحداهما موازيا للجانب الأيسر للأخرى، والجانب الأيمن موازيا للجانب الأيمن للأخرى الجانبان الأيسر والأيمن كما يشاهدان من الزاوية الرأسية حيث يلتقي الضلعان: (الشكل أ – 2)؛ أو
(جـ) كان الجانب الأيسر لإحداهما عموديًّا على الجانب الأيسر للأخرى، وكذلك الجانبان الأيمنان متعامدين بالمثل (الشكل أ – 3).

2. مجموع الزوايا في أي مثلث هو $180°$.

3. المثلثات المتشابهة. يقال عن مثلثين أنّهما متشابهان إذا كانت زواياهما الثلاث جميعها متساوية في (الشكل أ – 4)، $\theta_1 = \phi_1,\ \theta_2 = \phi_2,\ \theta_3 = \phi_3$ ،A–4. وعليه، تمتلك المثلثات المتشابهة الشكل البسيط نفسه مع احتمال أن تكون مختلفة الحجوم والاتجاهات.
هناك نظريتان مفيدتان للمثلثات المتشابهة :
(أ) يتشابه المثلثان إذا كانت أي زاويتين من زوايا أحدهما تساوي مثيلتيهما في المثلث الآخر. (وهذا صحيح لأن الزاوية الثالثة في كليهما يجب أن تكون مساوية للأخرى؛ لأن مجموع الزوايا الداخلية لأي مثلث هي $180°$).
(ب) تكون نسب أطوال أضلاع مثلثين متشابهين متساوية. في (الشكل أ – 4):

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3}.$$

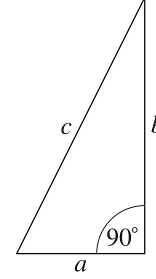
4. المثلثات المتطابقة. يتطابق المثلثان إذا أمكن وضع أحدهما فوق الآخر تماما. أي أنهما مثلثان متشابهان ولهما الحجم نفسه. ويكون المثلثان متطابقين إذا توافر أيّ مما يلي:
(أ) تساوي الأضلاع الثلاثة في المثلثين.
(ب) تساوي ضلعين والزاوية المحصورة بينهما (ضلع – زاوية – ضلع).
(جـ) تساوي زاويتين والضلع المحصور بينهما (زاوية – ضلع – زاوية).

4. مثلثات قائمة. يمتلك المثلث القائم زاوية واحدة مقدارها $90°$ (زاوية قائمة)؛ أي أنّ الضلعين الملتقيين عند الزاوية القائمة متعامدان (الشكل أ – 5). كما أنّ مجموع الزاويتين الأخيرتين (الحادتين) في المثلث قائم الزاوية هو $90°$.

5. نظرية فيثاغورس. مربع الوتر (الضلع المقابل للزاوية القائمة) في أيّ مثلث قائم الزاوية يساوي مجموع مربعي الضلعين الآخرين. في(الشكل أ – 5) .

$$c^2 = a^2 + b^2.$$

الشكل أ – 5



أ–7 الاقترانات المثلثية والمتماثلات

تعرف الاقترانات المثلثية لأي زاوية θ بوساطة إنشاء مثلث قائم حول تلك الزاوية كما هو مبين في الشكل أ – 6 ؛ المقابل والمجاور هما طولا الضلعين المقابل والمجاور للزاوية θ . والوتر هو طول الوتر

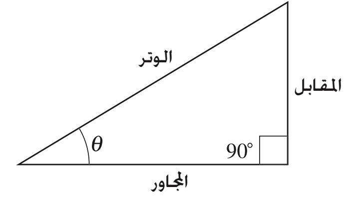
$$\sin\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{الوتر}} \qquad \csc\theta = \frac{1}{\sin\theta} = \frac{\text{الوتر}}{\text{المقابل}}$$

$$\cos\theta = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}} \qquad \sec\theta = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{\text{الوتر}}{\text{المجاور}}$$

$$\tan\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \qquad \cot\theta = \frac{1}{\tan\theta} = \frac{\text{المجاور}}{\text{المقابل}}$$

المجاور ^{2} + المقابل ^{2} = الوتر ^{2} (نظرية فيثاغورس).

الشكل أ – 6



يظهر (الشكل أ- 7) الإشارتين (+ و -) التي تظهرها كل من جيب (sin) وجيب تمام (cos) وظل (tan) الزوايا θ في الأرباع الأربعة ($0°$ إلى $360°$). لاحظ أن الزوايا تقاس مع اتجاه معاكس لاتجاه دوران عقارب الساعة ابتداءً من المحور السيني كما هو مبين؛ تقاس الزوايا السالبة من أسفل المحور السيني x باتجاه دوران عقارب الساعة: فعلى سبيل المثال $-30^o = +330^o$. وهكذا دواليك .

وفيما يلي بعض المتماثلات المفيدة من ضمن الاقترانات المثلثية :

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$$

$$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta = 2\cos^2\theta - 1 = 1 - 2\sin^2\theta$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\tan\theta}{1 - \tan^2\theta}$$

$$\sin(A \pm B) = \sin A\cos B \pm \cos A\sin B$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A\cos B \mp \sin A\sin B$$

$$\tan(A \pm B) = \frac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A\tan B}$$

$$\sin(180° - \theta) = \sin\theta$$

$$\cos(180° - \theta) = -\cos\theta$$

$$\sin(90° - \theta) = \cos\theta$$

$$\cos(90° - \theta) = \sin\theta$$

$$\sin\tfrac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{2}}$$

$$\cos\tfrac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}}$$

$$\tan\tfrac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{1 + \cos\theta}}$$

$$\sin A \pm \sin B = 2\sin\left(\frac{A \pm B}{2}\right)\cos\left(\frac{A \mp B}{2}\right).$$

الشكل أ – 7

الربع الأول ($0°$ to $90°$) $x > 0$ $y > 0$ — $\sin\theta = y/r > 0$, $\cos\theta = x/r > 0$, $\tan\theta = y/x > 0$

الربع الثاني ($90°$ to $180°$) $x < 0$ $y > 0$ — $\sin\theta > 0$, $\cos\theta < 0$, $\tan\theta < 0$

الربع الثالث ($180°$ to $270°$) $x < 0$ $y < 0$ — $\sin\theta < 0$, $\cos\theta < 0$, $\tan\theta > 0$

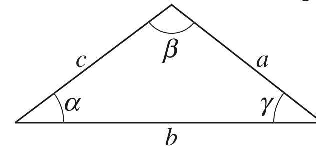
الربع الرابع ($270°$ to $360°$) $x > 0$ $y < 0$ — $\sin\theta < 0$, $\cos\theta > 0$, $\tan\theta < 0$

لأي مثلث (انظر الشكل أ – 8) :

$$\frac{\sin\alpha}{a} = \frac{\sin\beta}{b} = \frac{\sin\gamma}{c} \qquad \text{(قانون الجيوب)}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma \qquad \text{(قانون جيوب التمام)}$$

الشكل أ – 8



جدول المثلثات : قيم رقمية للجيب (sin)، وجيب التمام (cos)، والظل (tan)

الزاوية بالدرجات	الزاوية بالرديان	الجيب	الجيب التمام	الظل	الزاوية بالدرجات	الزاوية بالرديان	الجيب	الجيب التمام	الظل
0°	0.000	0.000	1.000	0.000					
1°	0.017	0.017	1.000	0.017	46°	0.803	0.719	0.695	1.036
2°	0.035	0.035	0.999	0.035	47°	0.820	0.731	0.682	1.072
3°	0.052	0.052	0.999	0.052	48°	0.838	0.743	0.669	1.111
4°	0.070	0.070	0.998	0.070	49°	0.855	0.755	0.656	1.150
5°	0.087	0.087	0.996	0.087	50°	0.873	0.766	0.643	1.192
6°	0.105	0.105	0.995	0.105	51°	0.890	0.777	0.629	1.235
7°	0.122	0.122	0.993	0.123	52°	0.908	0.788	0.616	1.280
8°	0.140	0.139	0.990	0.141	53°	0.925	0.799	0.602	1.327
9°	0.157	0.156	0.988	0.158	54°	0.942	0.809	0.588	1.376
10°	0.175	0.174	0.985	0.176	55°	0.960	0.819	0.574	1.428
11°	0.192	0.191	0.982	0.194	56°	0.977	0.829	0.559	1.483
12°	0.209	0.208	0.978	0.213	57°	0.995	0.839	0.545	1.540
13°	0.227	0.225	0.974	0.231	58°	1.012	0.848	0.530	1.600
14°	0.244	0.242	0.970	0.249	59°	1.030	0.857	0.515	1.664
15°	0.262	0.259	0.966	0.268	60°	1.047	0.866	0.500	1.732
16°	0.279	0.276	0.961	0.287	61°	1.065	0.875	0.485	1.804
17°	0.297	0.292	0.956	0.306	62°	1.082	0.883	0.469	1.881
18°	0.314	0.309	0.951	0.325	63°	1.100	0.891	0.454	1.963
19°	0.332	0.326	0.946	0.344	64°	1.117	0.899	0.438	2.050
20°	0.349	0.342	0.940	0.364	65°	1.134	0.906	0.423	2.145
21°	0.367	0.358	0.934	0.384	66°	1.152	0.914	0.407	2.246
22°	0.384	0.375	0.927	0.404	67°	1.169	0.921	0.391	2.356
23°	0.401	0.391	0.921	0.424	68°	1.187	0.927	0.375	2.475
24°	0.419	0.407	0.914	0.445	69°	1.204	0.934	0.358	2.605
25°	0.436	0.423	0.906	0.466	70°	1.222	0.940	0.342	2.747
26°	0.454	0.438	0.899	0.488	71°	1.239	0.946	0.326	2.904
27°	0.471	0.454	0.891	0.510	72°	1.257	0.951	0.309	3.078
28°	0.489	0.469	0.883	0.532	73°	1.274	0.956	0.292	3.271
29°	0.506	0.485	0.875	0.554	74°	1.292	0.961	0.276	3.487
30°	0.524	0.500	0.866	0.577	75°	1.309	0.966	0.259	3.732
31°	0.541	0.515	0.857	0.601	76°	1.326	0.970	0.242	4.011
32°	0.559	0.530	0.848	0.625	77°	1.344	0.974	0.225	4.331
33°	0.576	0.545	0.839	0.649	78°	1.361	0.978	0.208	4.705
34°	0.593	0.559	0.829	0.675	79°	1.379	0.982	0.191	5.145
35°	0.611	0.574	0.819	0.700	80°	1.396	0.985	0.174	5.671
36°	0.628	0.588	0.809	0.727	81°	1.414	0.988	0.156	6.314
37°	0.646	0.602	0.799	0.754	82°	1.431	0.990	0.139	7.115
38°	0.663	0.616	0.788	0.781	83°	1.449	0.993	0.122	8.144
39°	0.681	0.629	0.777	0.810	84°	1.466	0.995	0.105	9.514
40°	0.698	0.643	0.766	0.839	85°	1.484	0.996	0.087	11.43
41°	0.716	0.656	0.755	0.869	86°	1.501	0.998	0.070	14.301
42°	0.733	0.669	0.743	0.900	87°	1.518	0.999	0.052	19.081
43°	0.750	0.682	0.731	0.933	88°	1.536	0.999	0.035	28.636
44°	0.768	0.695	0.719	0.966	89°	1.553	1.000	0.017	57.290
45°	0.785	0.707	0.707	1.000	90°	1.571	1.000	0.000	∞

أ-8 اللوغاريتمات

اللوغاريتمات العامة

تُعرّف اللوغاريتمات على الشكل التالي:

إذا كانت $y = A^x$، فإن $x = \log_A y$.

أي أن لوغاريتم العدد y للأساس A هو ذلك العدد، كالأس A يعيد لنا العدد y. وللوغاريتمات العامة، فإن الأساس هو 10. وعليه،

إذا كانت $y = 10^x$، فإن $x = \log y$

اللوغاريتمات الطبيعية

الرمز السفلي 10 في $\log_{10}$ يحذف عادة عند التعامل مع اللوغاريتمات العامة. وتستخدم أحيانًا أخرى القاعدة الأسية $e = 2.718\cdots$، رقم طبيعي. وتُدعى هذه باللوغاريتمات الطبيعية وتكتب ln. ولهذا،

إذا كانت $y = e^x$، فإن $x = \ln y$.

ولأي عدد y، فإن العلاقة بين نوعي اللوغاريتم هي

$$\ln y = 2.3026 \log y$$

بعض قوانين اللوغاريتمات البسيطة هي كالتالي:

$$\log (ab) = \log a + \log b \qquad (7-أ)$$

وهذا صحيح لأنه إذا كانت $a = 10^n$ و $b = 10^m$، فعندئذ $ab = 10^{n+m}$. ومن تعريف اللوغاريتم، $\log a = n, \log b = m,$ و $\log (ab) = n + m$ وعليه $\log (ab) = n + m = \log a + \log b$. وبشكل مماثل، نستطيع إثبات أن

$$\log \left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b \qquad (8-أ)$$

$$\log a^n = n \log a \qquad (9-أ)$$

وهذه القوانين الثلاثة تنطبق على اللوغاريتمات العامة إضافة إلى أي لوغاريتم سواء أكان طبيعيًّا أم لا.لقد استخدمت اللوغاريتمات في السابق كطريقة لتبسيط بعض أنواع الحسابات. وبسبب تطور الحاسبات الإلكترونية والحواسيب، لم يعد استخدامها أمرا شائعا. ومع هذا، فإن اللوغاريتمات لا تزال تظهر في بعض المعادلات الفيزيائية. لذا، من المفيد معرفة كيفية التعامل معها. إذا كنت لا تملك آلة حاسبة يمكنك استخدامها لحساب اللوغاريتمات، فإنك تستطيع بسهولة استخدام الجدول اللوغاريتمي، كالجدول الصغير المبين هنا (الجدول أ $-$ 1). أعطي العدد N إلى خانتين (بعض الجداول تعطي N إلى ثلاث خانات أو أكثر) ؛ الخانة الأولى في العمود الرئيس إلى اليسار، والخانة الثانية في الصف الأفقي على الامتداد العلوي. وعلى سبيل المثال، يشير الجدول إلى أن $\log 1.0 = 0.000$، و $\log 1.1 = 0.41$، و $\log 4.1 = 0.613$. ولا يحتوي (الجدول أ $-$ 1)على الفاصلة العشرية $-$ وهو أمر مفهوم. ويعطي الجدول اللوغاريتمات للأعداد بين 1.0 و 9.9 ؛ وللأعداد الأكبر أو الأصغر ، نستخدم (القاعدة أ $-$ 7)

$$\log (ab) = \log a + \log b$$

على سبيل المثال

$$\log (380) = \log (3.8 \times 10^2) = \log (3.8) + \log (10^2).$$

ومن الجدول، $\log 3.8 = 0.580$ ؛ ومن القاعدة أ $-$ 9 ،

$$\log (10^2) = 2 \log (10) = 2$$

بما أن $\log (10) = 1$. وهذا يتبع من تعريف اللوغاريتم: إذا كان من الممكن كتابة القاعدة الأسية e كمتتالية لا نهائية.

$$e = 1 + \frac{1}{1} + \frac{1}{1\cdot 2} + \frac{1}{1\cdot 2\cdot 3} + \frac{1}{1\cdot 2\cdot 3\cdot 4} + \cdots$$

الجدول أ-1 تحضير اللوغاريتمات الشائعة

N	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	000	041	079	114	146	176	204	230	255	279
2	301	322	342	362	380	398	415	431	447	462
3	477	491	505	519	531	544	556	568	580	591
4	602	613	623	633	643	653	663	672	681	690
5	699	708	716	724	732	740	748	756	763	771
6	778	785	792	799	806	813	820	826	833	839
7	845	851	857	863	869	875	881	886	892	898
8	903	908	914	919	924	929	935	940	944	949
9	954	959	964	968	973	978	982	987	991	996

$10 = 10^1$. فإن $\log(10) = 1$ لذلك .

$$\log(380) = \log(3.8) + \log(10^2)$$
$$= 0.580 + 2$$
$$= 2.580.$$

وبالمثل.

$$\log(0.081) = \log(8.1) + \log(10^{-2})$$
$$= 0.908 - 2 = -1.092.$$

اللوغاريتم المعاكس

ونحتاج في بعض الأوقات إلى القيام بالعملية العكسية؛ أي إيجاد العدد N المصاحب للوغاريتم 2.670 كمثال. ويدعى هذا " أخذ اللوغاريتم المعاكس" . للقيام بذلك، نفصل الرقم 2.670 إلى جزأين، ونجعل الفصل عند الفاصلة العشرية كما يلي :

$$\log N = 2.670 = 2 + 0.670$$
$$= \log 10^2 + 0.670$$

تقريب

ثم ننظر إلى (الجدول أ $- 1$)لمعرفة العدد الذي لوغاريتمه يساوي 0.670 فلا نجده. لذا، نلجأ إلى التقريب: نجد $\log 4.6 = 0.663$، وأن $\log 4.7 = 0.672$ وعليه، فإن العدد الذي نبحث عنه هو ما بين 4.6 و 4.7 . وهو أقرب إلى العدد الأخير بمقدار $\frac{7}{9}$. ونستطيع القول إن $\log 4.68 = 0.670$ تقريبا.

إذا كان اللوغاريتم سالبا، وليكن -2.180 ، نكمل كالتالي:

$$\log N = -2.180 = -3 + 0.820$$
$$= \log 10^{-3} + \log 6.6 = \log 6.6 \times 10^{-3}$$

لذا، $N = 6.6 \times 10^{-3}$. لاحظ أنّنا أضفنا إلى اللوغاريتم المعطى العدد الصحيح الأكبر الذي يليه (3 في هذه الحالة) ليكون لدينا عدد صحيح، إضافة إلى عدد عشري بين 0 و 1.0 يمكن البحث عن لوغاريتمه المضاد في الجدول.

ملحق ب

نظائر مختارة

(1) العدد الذري نشطاً Z	(2) العنصر	(3) الرمز	(4) العدد الكتلي A	(5) الكتلة الذرية*	(6) الوفرة ٪ (او نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	(7) نصف العمر (إذا كان مشعاً)
0	(Neutron)	n	1	1.008665	β^-	10.24 min
1	Hydrogen	H	1	1.007825	99.9885%	
	Deuterium	d or D	2	2.014102	0.0115%	
	Tritium	t or T	3	3.016049	β^-	12.33 yr
2	Helium	He	3	3.016029	0.000137%	
			4	4.002603	99.999863%	
3	Lithium	Li	6	6.015122	7.59%	
			7	7.016004	92.41%	
4	Beryllium	Be	7	7.016929	EC, γ	53.29 days
			9	9.012182	100%	
5	Boron	B	10	10.012937	19.9%	
			11	11.009306	80.1%	
6	Carbon	C	11	11.011434	β^+, EC	20.39 min
			12	12.000000	98.93%	
			13	13.003355	1.07%	
			14	14.003242	β^-	5730 yr
7	Nitrogen	N	13	13.005739	β^+, EC	9.965 min
			14	14.003074	99.632%	
			15	15.000109	0.368%	
8	Oxygen	O	15	15.003065	β^+, EC	122.24 s
			16	15.994915	99.757%	
			18	17.999160	0.205%	
9	Fluorine	F	19	18.998403	100%	
10	Neon	Ne	20	19.992440	90.48%	
			22	21.991386	9.25%	
11	Sodium	Na	22	21.994437	β^+, EC, γ	2.6019 yr
			23	22.989770	100%	
			24	23.990963	β^-, γ	14.951 h
12	Magnesium	Mg	24	23.985042	78.99%	
13	Aluminum	Al	27	26.981538	100%	
14	Silicon	Si	28	27.976927	92.2297%	
			31	30.975363	β^-, γ	157.3 min

* الكتل المبينة في الجدول (5) هي للذرات المتعادلة من الالكترونات عددها Z

(1) العدد الذري Z نشطاً	(2) العنصر	(3) الرمز	(4) العدد الكتلي A	(5) الكتلة الذرية	(6) الوفرة % (او نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	(7) نصف العمر (إذا كان مشعاً)
15	Phosphorus	P	31	30.973762	100%	
			32	31.973907	β^-	14.262 days
16	Sulfur	S	32	31.972071	94.9%	
			35	34.969032	β^-	87.38 days
17	Chlorine	Cl	35	34.968853	75.78%	
			37	36.965903	24.22%	
18	Argon	Ar	40	39.962383	99.600%	
19	Potassium	K	39	38.963707	93.258%	
			40	39.963999	0.0117%	
					β^-, EC, γ, β^+	1.277×10^9 yr
20	Calcium	Ca	40	39.962591	96.94%	
21	Scandium	Sc	45	44.955910	100%	
22	Titanium	Ti	48	47.947947	73.72%	
23	Vanadium	V	51	50.943964	99.750%	
24	Chromium	Cr	52	51.940512	83.789%	
25	Manganese	Mn	55	54.940363	100%	
26	Iron	Fe	56	55.934942	91.75%	
27	Cobalt	Co	59	58.933200	100%	
			60	59.933822	β^-, γ	5.2708 yr
28	Nickel	Ni	58	57.935348	68.077%	
			60	59.930791	26.223%	
29	Copper	Cu	63	62.929601	69.17%	
			65	64.927794	30.83%	
30	Zinc	Zn	64	63.929147	48.6%	
			66	65.926037	27.9%	
31	Gallium	Ga	69	68.925581	60.108%	
32	Germanium	Ge	72	71.922076	27.5%	
			74	73.921178	36.3%	
33	Arsenic	As	75	74.921596	100%	
34	Selenium	Se	80	79.916522	49.6%	
35	Bromine	Br	79	78.918338	50.69%	
36	Krypton	Kr	84	83.911507	57.00%	
37	Rubidium	Rb	85	84.911789	72.17%	
38	Strontium	Sr	86	85.909262	9.86%	
			88	87.905614	82.58%	
			90	89.907738	β^-	28.79 yr
39	Yttrium	Y	89	88.905848	100%	
40	Zirconium	Zr	90	89.904704	51.4%	
41	Niobium	Nb	93	92.906378	100%	
42	Molybdenum	Mo	98	97.905408	24.1%	
43	Technetium	Tc	98	97.907216	β^-, γ	4.2×10^6 yr
44	Ruthenium	Ru	102	101.904350	31.55%	
45	Rhodium	Rh	103	102.905504	100%	
46	Palladium	Pd	106	105.903483	27.33%	
47	Silver	Ag	107	106.905093	51.839%	
			109	108.904756	48.161%	

(1) العدد الذري Z نشطاً	(2) العنصر	(3) الرمز	(4) العدد الكتلي A	(5) الكتلة الذرية	(6) الوفرة % (او نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	(7) نصف العمر (إذا كان مشعاً)
48	Cadmium	Cd	114	113.903358	28.7%	
49	Indium	In	115	114.903878	95.71%; β^-	4.41×10^{14} yr
50	Tin	Sn	120	119.902197	32.58%	
51	Antimony	Sb	121	120.903818	57.21%	
52	Tellurium	Te	130	129.906223	34.1%; $\beta^-\beta^-$	$> 5.6 \times 10^{22}$ yr
53	Iodine	I	127	126.904468	100%	
			131	130.906124	β^-, γ	8.0207 days
54	Xenon	Xe	132	131.904155	26.89%	
			136	135.907220	8.87%; $\beta^-\beta^-$	$> 3.6 \times 10^{20}$ yr
55	Cesium	Cs	133	132.905447	100%	
56	Barium	Ba	137	136.905821	11.232%	
			138	137.905241	71.70%	
57	Lanthanum	La	139	138.906348	99.910%	
58	Cerium	Ce	140	139.905434	88.45%	
59	Praseodymium	Pr	141	140.907648	100%	
60	Neodymium	Nd	142	141.907719	27.2%	
61	Promethium	Pm	145	144.912744	EC, α	17.7 yr
62	Samarium	Sm	152	151.919728	26.75%	
63	Europium	Eu	153	152.921226	52.19%	
64	Gadolinium	Gd	158	157.924101	24.84%	
65	Terbium	Tb	159	158.925343	100%	
66	Dysprosium	Dy	164	163.929171	28.2%	
67	Holmium	Ho	165	164.930319	100%	
68	Erbium	Er	166	165.930290	33.6%	
69	Thulium	Tm	169	168.934211	100%	
70	Ytterbium	Yb	174	173.938858	31.8%	
71	Lutetium	Lu	175	174.940768	97.41%	
72	Hafnium	Hf	180	179.946549	35.08%	
73	Tantalum	Ta	181	180.947996	99.988%	
74	Tungsten (wolfram)	W	184	183.950933	30.64%; α	$> 4 \times 10^{18}$ yr
75	Rhenium	Re	187	186.955751	62.60%; β^-	4.35×10^{10} yr
76	Osmium	Os	191	190.960928	β^-, γ	15.4 days
			192	191.961479	40.78%	
77	Iridium	Ir	191	190.960591	37.3%	
			193	192.962924	62.7%	
78	Platinum	Pt	195	194.964774	33.832%	
79	Gold	Au	197	196.966552	100%	
80	Mercury	Hg	199	198.968262	16.87%	
			202	201.970626	29.9%	
81	Thallium	Tl	205	204.974412	70.476%	
82	Lead	Pb	206	205.974449	24.1%	
			207	206.975881	22.1%	
			208	207.976636	52.4%	
			210	209.984173	β^-, γ, α	22.3 yr
			211	210.988731	β^-, γ	36.1 min
			212	211.991887	β^-, γ	10.64 h
			214	213.999798	β^-, γ	26.8 min

(1) العدد الذري نشطاً Z	(2) العنصر	(3) الرمز	(4) العدد الكتلي A	(5) الكتلة الذرية	(6) الوفرة % (او نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	(7) نصف العمر (إذا كان مشعاً)
83	Bismuth	Bi	209	208.980383	100%	
			211	210.987258	α, γ, β^-	2.14 min
84	Polonium	Po	210	209.982416	α, γ, EC	138.376 days
			214	213.995186	α, γ	164.3 μs
85	Astatine	At	218	218.008681	α, β^-	1.5 s
86	Radon	Rn	222	222.017570	α, γ	3.8235 days
87	Francium	Fr	223	223.019731	β^-, γ, α	22.00 min
88	Radium	Ra	226	226.025403	α, γ	1600 yr
89	Actinium	Ac	227	227.027747	β^-, γ, α	21.773 yr
90	Thorium	Th	228	228.028731	α, γ	1.9116 yr
			232	232.038050	100%; α, γ	1.405×10^{10} yr
91	Protactinium	Pa	231	231.035879	α, γ	3.276×10^4 yr
92	Uranium	U	232	232.037146	α, γ	68.9 yr
			233	233.039628	α, γ	1.592×10^5 yr
			235	235.043923	0.720%; α, γ	7.038×10^8 yr
			236	236.045562	α, γ	2.342×10^7 yr
			238	238.050783	99.274%; α, γ	4.468×10^9 yr
			239	239.054288	β^-, γ	23.45 min
93	Neptunium	Np	237	237.048167	α, γ	2.144×10^6 yr
			239	239.052931	β^-, γ	2.3565 days
94	Plutonium	Pu	239	239.052157	α, γ	24,110 yr
			244	244.064198	α	8.00×10^7 yr
95	Americium	Am	243	243.061373	α, γ	7370 yr
96	Curium	Cm	247	247.070347	α, γ	1.56×10^7 yr
97	Berkelium	Bk	247	247.070299	α, γ	1380 yr
98	Californium	Cf	251	251.079580	α, γ	898 yr
99	Einsteinium	Es	252	252.082970	α, EC, γ	471.7 days
100	Fermium	Fm	257	257.095099	α, γ	100.5 days
101	Mendelevium	Md	258	258.098425	α, γ	51.5 days
102	Nobelium	No	259	259.10102	α, EC	58 min
103	Lawrencium	Lr	262	262.1097	α, EC, fission	3.6 h
104	Rutherfordium	Rf	263	263.11831	fission	10 min
105	Dubnium	Db	262	262.11415	α, fission, EC	34 s
106	Seaborgium	Sg	266	266.1219	α, fission	21 s
107	Bohrium	Bh	264	264.1247	α	0.44 s
108	Hassium	Hs	269	269.1341	α	9 s
109	Meitnerium	Mt	268	268.1388	α	0.07 s
110	Darmstadtium	Ds	271	271.14608	α	0.06 ms
111		Uuu	272	272.1535	α	1.5 ms
112		Uub	277	277	α	0.24 ms

ملحق ج

دوران الأطــر المرجعيــة
القوى القصورية؛ أثر كوريولس

الأطر المرجعيّة القصوريّة وغير القصوريّة

اختبرنا في الفصلين 5 و 8 حركة الأجسام بما فيها الدائرية والدورانية من الخارج كمراقبين ثابتين على الأرض. وفي بعض الأحيان يكون من الملائم أن نضع أنفسنا (نظريًّا، إن لم يكن فعليًّا) في إطار مرجعي دوّار. ودعنا نختبر حركة الأجسام من وجهة نظر، أو من الإطار المرجعي، لأشخاص يجلسون على منصة دوّارة كمنصة العجلة الدوّارة. سيبدو لهم وكأنّ بقية العالم تدور من حولهم. ولكن لنركز على ما سيلاحظون عندما يضعون كرة طاولة على أرضية المنصة الدوارة، والتي نفترضها ملساء. إذا وضعوا الكرة على الأرضية الدوّارة بتأنٍ، دون أي دفع، فإنهم سيلاحظون تسارعها من السكون إلى الخارج كما هو مبين في (الشكل جـ - 1 أ.) ووفق قانون نيوتن الأول، يبقى الجسم الساكن ساكنا إن لم تؤثر فيه قوة خارجية.



الشكل ج - 1 مسار كرة تركت على طاولة دوّارة كما هو مبين في (أ) إطار الطاولة المرجعي ثابت على الأرض، وفي (ب) بالنسبة لاطار مرجعي ثابت على الأرض

ولكن، وفق المراقبين على المنصة الدوارة، فإن الكرة بدأت في التحرك على الرغم من عدم وجود قوة تؤثر فيها. وللمراقبين على الأرض، فإن هذا كله في غاية الوضوح: كانت الكرة تمتلك سرعة ابتدائية لحظة تحررها (بسبب تحرك المنصة)، وببساطة فهي تستمر في الحركة في مسار خطي – منتظم كما هو مبين في (الشكل ج - 1 ب) ، وفق قانون نيوتن الأول.

ولكن ماذا يجب أن نفعل بالنسبة لإطار المراقبين المرجعي على المنصة الدوّارة؟

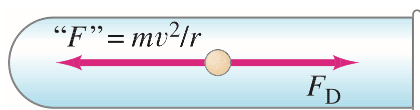
من الواضح أن قانون نيوتن الأول، قانون القصور، لا ينطبق في هذا الإطار المرجعي الدوّار. ولهذا السبب، يُسمّى إطارٌ كهذا إطارا مرجعيا لا قصوري. والإطار المرجعيّ القصوريّ كما تمت مناقشته في (الفصل 4) هو إطارٌ ينطبق فيه قانون القصور أو قانون نيوتن الأول، وكذلك قانونا نيوتن الثاني والثالث. وفي إطار مرجعيّ لا قصوريّ، كمنصتنا الدوّارة، لن ينطبق قانون نيوتن الثاني فيه أيضا. وعلى سبيل المثال في الحالة الموصوفة في الأعلى، لا توجد محصلة قوة على الكرة؛ ومع هذا فبالنسبة للمنصة الدوّارة، فإن الكرة تتسارع.

قوى (قصورية) وهمية

بسبب عدم تماسك قوانين نيوتن عند أخذ الملاحظات بالنسبة إلى الإطار المرجعي الدوّار، يمكن لحسابات الحركة أن تكون معقدة. ومع هذا، فلا يزال بإمكاننا تطبيق قوانين نيوتن في إطار مرجعي كهذا إذا استخدمنا الحيلة. تطير الكرة الموضوعة فوق المنصة الدوارة في (الشكل ج - 1 أ) إلى الخارج عندما تترك لشأنها (كما لو أنّ هناك قوّةً تؤثر فيها – على الرغم من أنه كما رأينا في الأعلى، ليست هناك قوة فعلية تقوم بذلك)؛ لذا فإن الحيلة التي سنستعملها هنا هي كتابة المعادلة $\Sigma F = ma$ كما لو أن قوة تساوي mv^2/r (or $m\omega^2 r$) تؤثر في اتجاه ماسي إلى الخارج في الجسيم بالإضافة إلى أي قوى أخرى قد تؤثر فيه أيضاً. تدعى هذه القوةُ الإضافية، والتي قد يرمز لها ''كقوة مركزية'' لأنها تبدو وكأنها تعمل إلى الخارج . **القوةّ الوهميةّ أو القوة غير الحقيقية**. وهي قوة تخيلية. (وهمية أو غير حقيقية) بسبب عدم وجود أي جسيم يؤثر فيها. إضافة إلى ذلك، عند متابعة هذا الأثر من إطار مرجعي قصوري، لن نجد له أي أثر نهائيا. ولقد اخترعنا هذه القوة الوهمية لكي نتمكن من عمل حسابات في إطار لا قصوري باستخدام قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$. وعليه، فإن المراقب في الإطار اللاقصوري في (الشكل ج - 1 أ)يستخدم قانون نيوتن الثاني لحركة الكرة إلى الخارج مفترضا أن قوة تساوي mv^2/r تؤثر فيها. وتسمى هذه القوى الوهمية أيضا **بالقوة القصورية** لأن نشوءها ينجم فقط عن كون الإطار المرجعي غير قصوري. ونستطيع أن نختبر حركة جسيم ما في جهاز طرد مركزي (البند 5 – 5) من الإطار المرجعي لأنبوب الاختبار الدوّار. وفي هذا الإطار المرجعي، تتحرك الجسيمات إلى درجة في مسار مستقيم نحو أسفل الأنبوب. (ومن إطار الأرض المرجعي، فإن الجسيمات تبقى تدور وتدور). ويمكن حساب تسارع الجسيم نسبة إلى الأنبوب الدوار باستخدام $F = ma$ وفي حالة إضافة قوة وهمية، "F" تساوي $m\omega^2 r = m(v^2/r)$ وتؤثر باتجاه أسفل الأنبوب بالإضافة إلى قوة الانزياح F_D التي يؤثرها المائع في الجسيم (الشكل ج - 2) نحو أعلى الأنبوب.

قوة وهمية (قوة غير حقيقية)

قوة قصورية



الشكل جـ - 2 القوى على جسيم في أنبوب اختبار يدور في جهاز طرد مركزي، كما يشاهد في الإطار المرجعي لأنبوب الاختبار.

ناقشنا في (البند 5 – 3) القوى على شخص ما في سيارة تدور حول منعطف (الشكل 5 – 11) من وجهة نظر إطار قصوري. أما السيارة، على الوجه الآخر، فهي ليست إطارا قصوريا. وقد يفسّر الركاب في سيارة كهذه أنهم قد ضغطوا إلى الخارج كنتيجة لتأثير قوة مركزية'' . ولكنهم يحتاجون إلى إدراك أنها قوة وهمية لعدم وجود ما يسببها. وهذا الأثر ناجم عن وجودهم في إطار مرجعي لا قصوري.

تدور الأرض أيضاً حول محورها. لذا، وبالتحديد، فإن قوانين نيوتن غير صحيحة على الأرض. ومهما يكن، فإنّ أثر دوران الأرض في العادة صغيرٌ جدًّا لدرجة يمكن عندها إهماله، مع أنّه يؤثر في حركة الكتل الهوائية الكبيرة وتيارات المحيط. وبسبب دوران الأرض ، تركزت مادة الأرض أكثر قليلًا عند خط الاستواء. ولذلك، فإنّ الأرض ليست كرة مثالية ولكنّها أكثر امتلاء عند خط الاستواء مقارنة ممّا هي عليه عند قطبيها.

أثر كوريولس

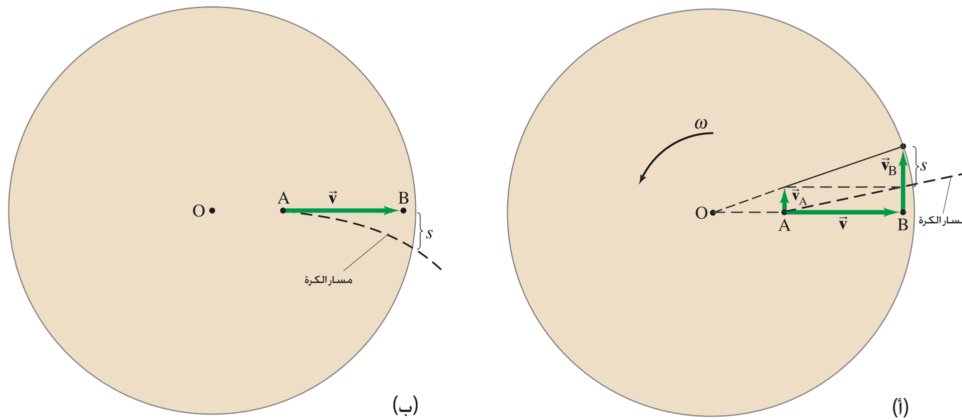
توجد قوة أخرى وهميّةٌ تُسَمّى قوة كوريولس في إطار مرجعي يدور بسرعة زاوية مرجعية ω (نسبة إلى إطار قصوري). وتظهر هذه القوة وكأنها تعمل على جسم ما في إطار مرجعي دوّار فقط إذا كان الجسم يتحرك نسبة إلى ذلك الإطار المرجعي، وهي تعمل على انحراف الجسم بالاتجاه الجانبي . كما أنّها ناتجة من كون الإطار المرجعي لا قصوري. ولهذا، يشار إليها كقوة قصورية. ولمعرفة كيفية نشوء قوة كوريولس، خذ في الحسبان شخصين A و B، في وضع السكون على منصة تدور بسرعة زاوية ω، كما هو مبين في (الشكل جـ - 3 أ). وهما موضوعان عند بعدين: r_A و r_B على الترتيب من محور الدوران (عند 0). تقذف السيدة عند A الكرة بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$ (في إطارها المرجعي) قطريا على امتداد نصف القطر إلى الخارج باتجاه الرجل B قرب الحافة الخارجية للمنصة . في (الشكل جـ - 3 أ)، ننظر إلى هذه الحالة من إطار مرجعي قصوري.

تمتلك الكرة سرعة ابتدائية $\vec{\mathbf{v}}$ قطرية على امتداد نصف القطر إلى الخارج، ولها أيضا سرعة مماسية $\vec{\mathbf{v}}_A$ ناجمة عن دوران المنصة. والآن، تشير (المعادلة $8-4$) إلى أن $v_A = r_A\omega$، حيث r_A هو البعد القطري للسيدة عن محور الدوران عند 0. وإذا كان الرجل B له السرعة v_A نفسها، فستصله الكرة تماما. لكن سرعته أكبر من v_A (الشكل جـ - 3 أ) لأنه أكثر بعدا عن محور الدوران. سرعته $v_B = r_B\omega$، وهي أكبر من v_A لأن $r_B > r_A$. لذا، عندما تصل الكرة إلى حافة المنصة الخارجية، فإنها تمر من نقطة يكون قد مر عليها سابقا الرجل B لأنّ سرعته في ذلك الاتجاه أعلى من سرعة الكرة. وعليه، فإن الكرة ستمر من خلفه.

يظهر (الشكل ج - 3 ب) الحالة كما تشاهد من المنصة الدوارة كإطار مرجعي. A و B ساكنان، وقذفت الكرة بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$ باتجاه B، ولكنها تنحرف إلى اليمين كما هو مبين وتمرّ من خلف B كما ورد سابقا. وهذا ليس أثر قوة مركزية، لأن القوة الطاردة من المركز تعمل على امتداد القطر إلى الخارج. وبدلا من ذلك، يعمل هذا الأثر جانبيًّا، عموديًّا على ، ويدعى تسارع كوريولس، ويقال إنه ناتج من قوة كوريولس، وهي قوة قصورية وهمية. تفسيرها كما شوهد من نظام قصوري أعطي قبل قليل : إنه الأثر الناتج من الوجود في نظام دوّار، حيث تمتلك النقاط الأبعد عن محور الدوران سرعات خطية أعلى. وعلى الجانب الآخر، عندما تشاهد من النظام الدوار، نستطيع أن نصف الحركة باستخدام قانون نيوتن الثاني، $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$، وذلك عندما نضيف حد '' القوة التي '' تعود لأثر كوريولس.

وسنحدد الآن قيمة تسارع كوريولس للحالة البسيطة الموصوفة في الأعلى. (نفترض أن v كبيرة والمسافات قصيرة، لكي نستطيع إهمال الجاذبية).

الشكل ج - 3 الأصل في أثر كوريولس. بالنظر نحو الأسفل إلى المنصة الدوارة، (أ) كما تشاهد من نظام قصوري غير دوار، (ب) كما تشاهد من منصة دوارة كإطار مرجعي.



ونجري الحسابات من الإطار المرجعي القصوري (الشكل جـ - 3 أ). تتحرك الكرة قطريًّا إلى الخارج مسافة $r_B - r_A$ بسرعة v خلال زمن ما t يعطى كما يلي:

$$r_B - r_A = vt.$$

وخلال هذا الزمن، تتحرك الكرة إلى الجانب مسافة s_A تعطى على النحو الآتي:

$$s_A = v_A t.$$

وفي هذا الزمن، يتحرك الرجل B مسافة

$$s_B = v_B t.$$

ولذلك تمر الكرة من خلفه مسافة s (الشكل جـ 3 أ) تعطى كالتالي:

$$s = s_B - s_A = (v_B - v_A)t.$$

ولقد رأينا سابقا أن $v_A = r_A\omega$ و $v_B = r_B\omega$، لذا

$$s = (r_B - r_A)\omega t.$$

ونعوض $r_B - r_A = vt$ (انظر إلى الأعلى) لنحصل على

$$s = \omega v t^2. \qquad \text{(ج - 1)}$$

وهذه s نفسها تساوي الإزاحة الجانبية كما تشاهد من النظام الدوار (جـ - 1) اللا قصوري (الشكل جـ - 3 ب).

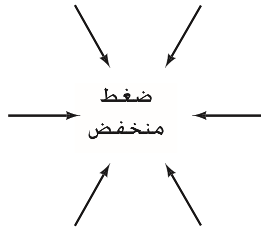
ونرى مباشرة أن المعادلة جـ - 1 تعود إلى حركة بتسارع ثابت. كما رأينا في الفصل 2 (انظر المعادلة 2 – 11 ب)، $y = \frac{1}{2}at^2$ لتسارع ثابت (مع سرعة ابتدائية صفر في الاتجاه الصادي y). لذا، إذا كتبنا المعادلة جـ - 1 على الشكل $s = \frac{1}{2}a_{Cor}t^2$، فسنرى أن تسارع كوريولس a_{Cor} هو

$$a_{Cor} = 2\omega v. \qquad \text{(ج - 2)}$$

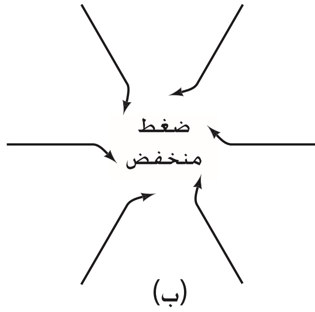
هذه العلاقة صحيحة لأي سرعة في السطح الدوّار؛ أي في السطح العمودي على محور الدوران (في الشكل ج - 3، المحور خلال النقطة O عموديّ على الصفحة).

إنّ أثر كوريولس له بعض الأهمية الظاهرة على الأرض بسبب دورانها. فهو يؤثر في حركة الكتل الهوائية، وعليه يؤثر في الطقس. وعند غياب أثر كوريولس هذا، سيسرع الهواء مباشرة إلى المناطق ذات الضغط المنخفض كما يشاهد في الشكل ج - 4 أ. ولكن بسبب هذا الأثر، تنحرف الرياح إلى اليمين في النصف الشمالي للكرة الأرضية (الشكل ج - 4 ب)، بسبب دوران الأرض من الغرب إلى الشرق. لذا، هناك ميل لوجود نمط من الرياح التي تتحرك بعكس دوران اتجاه عقارب الساعة حول المناطق ذات الضغط المنخفض. وعكس ذلك صحيح في النصف الجنوبي للكرة الأرضية. لذلك، فإن الأعاصير تدور بعكس دوران اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الشمالي، ولكنها مع اتجاه عقارب الساعة في نصفها الجنوبي. كما أنّ الأثر نفسه يفسر الرياح الشرقية قرب خط الاستواء؛ أي رياح متجهه جنوبا نحو خط الاستواء ستنحرف نحو الغرب (كما لو أنها قادمة من الشرق).

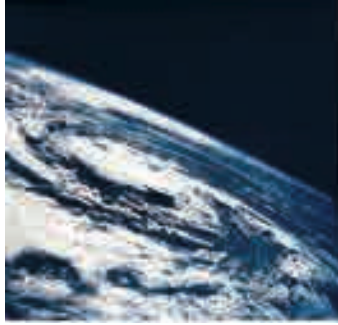
يعمل أثر كوريولس أيضا على الجسم الساقط؛ الجسم الذي يترك ليسقط من أعلى برج لن يصطدم بالأرض مباشرة أسفل نقطة سقوطه، بل سينحرف قليلا نحو الشرق عندما يشاهد من إطار قصوري. وسبب ذلك يعود إلى دوران قمة البرج بسرعة أعلى بقليل من سرعة دوران قاعدته.



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل ج - 4 (أ) ستنساب الرياح (الكتل الهوائية المتحركة) مباشرة باتجاه منطقة ضغط منخفض في حال عدم دوران الأرض؛ (ب) و (جـ) : بسبب دوران الأرض، تنحرف الرياح إلى اليمين في نصف الكرة الأرضية الشمالي (كما في الشكل ج - 3) كما لو أن هناك قوة وهمية (كوريولس) تفعل ذلك.

ملحق د

الحرارتان النوعيتان المولّيتان للغازات، والقسمة المتساوية للطاقة

الحرارتان النوعيتان المولّيتان للغازات

الحرارة النوعية

تعتمد قيمة الحرارتين النوعيتين للغازات على طريقة تنفيذ العملية الديناميكية الحرارية. ومن هذه العمليات عمليتان مهمتان يتم خلالهما إبقاء الحجم أو الضغط ثابتا. أمّا طريقة اختلافهما عن بعضهما فيظهرها (الجدول د – 1).

وتم توضيح الاختلاف بين الحرارتين النوعيتين بطريقة مناسبة بدلالة القانون الأول في الديناميكا الحرارية والنظرية الحركية. نستخدم للغازات عادة الحرارتين النوعيتين C_V و C_P، واللتين عُرّفتا على أنهما الحرارة اللازمة لرفع مول واحد من الغاز درجة مئوية واحدة $1\ C°$ عند ثبات الحجم والضغط على الترتيب. وبالمقارنة مع (المعادلة 14 – 2). تكون الحرارة Q اللازمة لرفع درجة حرارة n مول من الغاز بمقدار ΔT هي

$$Q = nC_V\,\Delta T \qquad \text{[حجم ثابت] (د – 1 أ)}$$

$$Q = nC_P\,\Delta T \qquad \text{[ضغط ثابت] (د – 1ب)}$$

وهو واضح من تعريف الحرارة النوعية المولية (مقارنة بين المعادلة 14 – 2 . والمعادلة د – 1)

$$C_P = Mc_P \quad \text{و} \quad C_V = Mc_V$$

حيث تمثل M كتلة الغاز الجزيئية ($M = m/n$ بدلالة g/mol). قيم الحرارة النوعية المولية موجودة في (الجدول د – 1).

وهذه القيم هي بالتقريب نفسها للغازات المختلفة التي تمتلك عدد الذرات نفسه في الجزيء.

ونستخدم الآن النظرية الحركية للغازات لمعرفة سبب أنّ قيم الحرارة النوعية للغازات عند عمليات الضغط– الثابت أعلى منها عند عمليات الحجم – الثابت.

الجدول د – 1 الحرارة النوعية للغازات عند 15°C

غاز	الحرارة النوعية (kcal/kg · K) c_P	c_V	الحرارة النوعية المولية (cal/mol · K) C_P	C_V	$C_P - C_V$ (cal/mol · K)
أحادي الذرة					
He	1.15	0.75	4.97	2.98	1.99
Ne	0.246	0.148	4.97	2.98	1.99
ثنائي الذرة					
N_2	0.248	0.177	6.95	4.96	1.99
O_2	0.218	0.155	7.03	5.03	2.00
ثلاثي الذرة					
CO_2	0.199	0.153	8.83	6.80	2.03
H_2O (100°C)	0.482	0.350	8.20	6.20	2.00
متعدد الذرة					
C_2H_6	0.412	0.343	12.35	10.30	2.05

تخيّل أنّه سُخّن غاز مثالي ببطء خلال هاتين الطريقتين؛ أولًا عند ثبات الحجم، ومن ثَمَّ عند ثبات الضغط. وفي كلتا العمليتين، ندع درجة الحرارة تزداد بالمقدار نفسه، ΔT. وخلال عملية ثبات الحجم، لا يبذل أي شغل لأن $\Delta V = 0$. لذا، ووفق القانون الأول في الديناميكا الحرارية، فإنّ الحرارة المضافة (يرمز لها Q_V) بمجملها تؤدي إلى زيادة في الطاقة الداخلية للغاز

$$Q_V = \Delta U.$$

أمّا في عملية ثبات الضغط، فإنّ هناك شغلًا يُبذل. وعليه، فإن الطاقة المضافة، Q_P، يجب أن تزيد من مقدار الطاقة الداخلية إضافة إلى أنّها تستخدم في بذل الشغل $W = P\,\Delta V$. لذا، ولأجل ΔT نفسها، علينا إضافة مقدار آخر من الحرارة خلال العملية عند ثبات الضغط مقارنة معها عند ثبات الحجم. ومن القانون الأول في الديناميكا الحرارية عند ثبات الضغط

$$Q_P = \Delta U + P\,\Delta V.$$

وبما أن ΔU هي نفسها في العمليتين (نحن من اختار ΔT متساوية)، نستطيع أن نجمع المعادلتين السابقتين كالتالي:

$$Q_P - Q_V = P\,\Delta V.$$

ومن قانون الغاز المثالي، $V = nRT/P$، ينتج لأجل عملية عند ثبات الضغط $\Delta V = nR\,\Delta T/P$ وعند تعويض هذا في المعادلة السابقة في الأعلى، وباستخدام (المعادلتين د – 1أ ، د- 1ب). نحصل على

$$nC_P\,\Delta T - nC_V\,\Delta T = P\left(\frac{nR\,\Delta T}{P}\right)$$

أو بعد الحذف

$$C_P - C_V = R. \qquad (د - 2)$$

وبما أنّ ثابت الغاز $R = 8.315\ \mathrm{J/mol\cdot K} = 1.99\ \mathrm{cal/mol\cdot K}$، فإنّنا نتنبأ بأن C_P ستكون أكبر من قيمة C_V بمقدار $1.99 cal/mol.K$. وبالفعل، إن هذا قريب جدًا مما حصلنا عليه عمليًا، كما يظهر آخر عمود في (الجدول د – 1).

والآن، نحسب الحرارة النوعية المولية لغاز أحادي الذرة باستخدام النظرية الحركية. ولعملية أجريت عند ثبات الحجم، عندما لا يبذل أي شغل، فإن القانون الأول في الديناميكا الحرارية يشير إلى أنّ

$$\Delta U = Q_V.$$

ولغاز مثالي أحادي الذري، فإن الطاقة الداخلية U هي الطاقة الحركية الكلية للجزيئات جميعها

$$U = N\left(\tfrac{1}{2}m\overline{v^2}\right) = \tfrac{3}{2}nRT$$

كما رأينا في (الجزء 14 – 2). وعندئذٍ، وباستخدام (المعادلة د – 1 أ)، نكتب $\Delta U = Q_V$ على الصورة الآتية:

$$\Delta U = \tfrac{3}{2}nR\,\Delta T = nC_V\,\Delta T \qquad (د - 3)$$

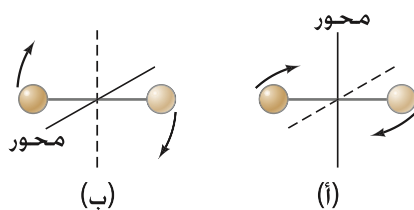
أو

$$C_V = \tfrac{3}{2}R. \qquad (د - 4)$$

وبما أنّ $R = 8.315\ \mathrm{J/mol\cdot K} = 1.99\ \mathrm{cal/mol\cdot K}$، فإن النظرية الحركية تتنبأ أن $C_V = 2.98\ \mathrm{cal/mol\cdot K}$ للغاز المثالي أحادي الذرة. وهذا قريب جدًا من القيم العملية للغازات كالهليوم والنيون (الجدول د – 1). ومن (المعادلة د – 2)، فإن قيمة C_P، المتوقعة هي نحو $4.97\ \mathrm{cal/mol\cdot K}$. وهذا متوافق مع التجربة أيضا (الجدول د – 1).

القسمة المتساوية للطاقة

تزداد الحرارتان النوعيتان الموليتان المقيستان للغازات الأكثر تعقيدا (الجدول د – 1)، كالغازات ثنائية الذرة (ذرتان) وثلاثية الذرات- مع ازدياد عدد الذرات في الجزيء. ونستطيع تفسير هذا بافتراض احتواء الطاقة الداخلية على الطاقة الحركية الانتقالية، وكذلك الأشكال الأخرى للطاقة. وعلى سبيل المثال، في الغاز ثنائي الذرة (الشكل د – 1)، تستطيع الذرتان الدوران حول محورين مختلفين (أما الدوران حول محور ثالث يمر خلال الذرتين فلا يولد أيّ طاقة، لأنّ عزم القصور الذاتي صغير للغاية). ويمكن للجزيئات أن تمتلك طاقة حركية دورانية إضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية. يولد أيّ طاقة، لأنّ عزم القصور الذاتي صغير للغاية. ويمكن للجزيئات أن تمتلك طاقة حركية دورانية إضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية.



الشكل د – 1 يستطيع الجزيء ثنائي الذرة الدوران حول محورين مختلفين.

درجات الحرية

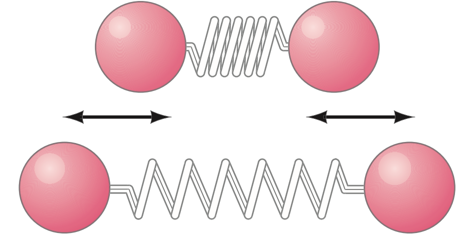
من المفيد أن نقدم فكرة درجات الحرية التي نعني بها عدد الطرق المستقلة التي تستطيع من خلالها الجزيئات امتلاك الطاقة. ومثال ذلك امتلاك الغاز أحادي الذرة ثلاث درجات من الحرية؛ لأن الذرة تستطيع أن تمتلك سرعة على امتداد المحاور x و y و z. وتعدّ هذه ثلاث حركات مستقلة لأنّ أيّ تغير في أيّ من المركبات لن يؤثر في الأخيرتين. وللجزيء ثنائي الذرة لدرجات الحرية الثلاث نفسها المرتبطة بالطاقة الحركية الانتقالية إضافة إلى درجتين أخريين مرتبطتين بالطاقة الحركية الدورانية (الشكل د -1). بمجموع خمس درجات من الحرية.

تقسيم الطاقة المتساوي

يشير (الجدول د -1) إلى أن C_V للغازات ثنائية الذرة هي نحو ضعف التي للغازات أحادية الذرة – أي بالنسبة نفسها لدرجات الحرية. وهذا ما قاد الفيزيائيين في القرن التاسع عشر إلى مبدأ تقسيم الطاقة المتساوي الذي ينص على أنّ درجات الحرية الفاعلة تتشارك بالطاقة بالتساوي. وكلّ درجة حرية نشطة للجزيء تمتلك بالمتوسط طاقة تساوي $\frac{1}{2}kT$. لذا، فإن متوسط طاقة الغاز أحادي الذرة هي $\frac{3}{2}kT$ (والتي عرفناها سابقا) لغاز ثنائي الذرة $\frac{5}{2}kT$. وعليه، فإن الطاقة الداخلية للغاز ثنائي الذرة ستكون

$U = N(\frac{5}{2}kT) = \frac{5}{2}nRT$، حيث n عدد المولات. وباستخدام الجدول ذاته الذي استخدمناه للغازات أحادية الذرة، سنرى أن الحرارة النوعية المولية للغازات ثنائية الذرة عند ثبات الحجم ستساوي $\frac{5}{2}R = 4.97\ \text{cal/mol}\cdot\text{K}$. وفق القيم المقيسة. وبما أن الجزيئات الأكثر تعقيداً تمتلك درجات حرية أكثر من ذلك فإنها تمتلك حرارة نوعية مولية أعلى.

وعلى الرغم من ذلك، أظهرت الأقيسة للغازات ثنائية الذرة عند درجات حرارة منخفضة جدًّا قيمة بها هي $\frac{3}{2}R$ فقط، كما لو أنّ هناك ثلاث درجات من الحرية فقط. وعند درجات الحرارة المرتفعة جدًّا، فإنّ قيمة C_V هي $\frac{7}{2}R$ تقريبًا، كما لو أنّ هناك سبع درجات من الحرية. وتفسير ذلك أنّه عند درجات الحرارة المنخفضة تمتلك الجزيئات جميعها تقريبا طاقة حركية انتقالية فقط. لذا، لن تكون هناك طاقة متوافرة للطاقة الدورانية وهناك فقط ثلاث درجات من الحرية "نشطة". وعند درجات حرارة مرتفعة جدا، تكون درجات الحرية الخمس جميعها نشطة إضافة إلى درجتين أخريَيْن، نفسرهما على أنهما مرتبطتان مع ذرتين مهتزتين، كما لو أنّهما موصلتان بزنبرك (الشكل د -2). هناك درجة حرية واحدة ناتجة من الطاقة الحركية للحركة الاهتزازية وتأتي الأخرى من طاقة الوضع للحركة الاهتزازية $(\frac{1}{2}kx^2)$. وعند درجة حرارة الغرفة، فإن هاتين الدرجتين لا تكونان نشطتين كما يظهر. وقد فسر آينشتاين سبب قلة أعداد درجات الحرية "النشطة عند درجة حرارة الغرفة باستخدام نظرية الكم.

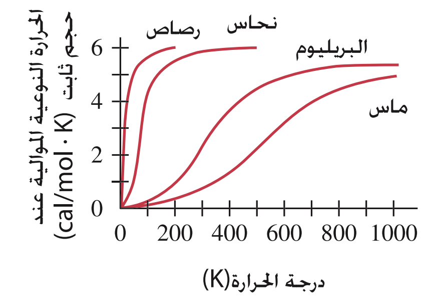


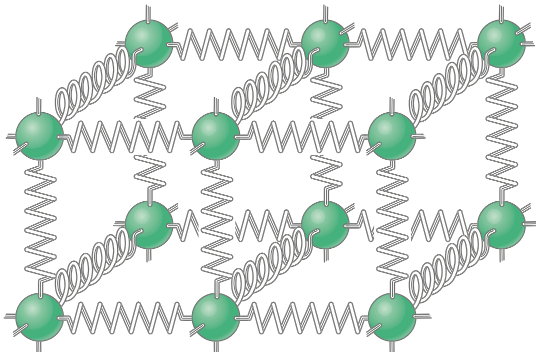
الشكل د – 2 يستطيع الجزيء ثنائي الذرة الاهتزاز كما لو أن الذرتين متصلتان بزنبرك، وبالطبع فهما ليستا كذلك، ولكنهما تؤثران في بعضهما بقوة ذات طبيعة كهربائية – بصورة تمثل قوة الزنبرك.

المواد الصلبة

يمكن تطبيق مبدأ التقسيم المتساوي للطاقة على المواد الصلبة أيضًا. تقترب الحرارة النوعية لأيِّ مادةٍ صلبة عند درجات حرارة عالية من *3R (6.0 cal/mol. K)* (الشكل د -3). ويُدعى هذا قيمة ديولنج وباتيت، وسُمّيت هكذا على أسماء العالِمَيْن اللذين كانا أول من قاساها في 1819 . لاحظ أن (الجدول 14 $-$ 1) يظهر قيم الحرارة النوعية لكل كيلو غرام، وليس لكل مول. وعند درجات الحرارة المرتفعة، فمن الظاهر أنّ لكلِّ ذرة ستّ درجات من الحرية. على الرغم من أنّ بعضها لا يكون نشطا عند درجات الحرارة المنخفضة . ويمكن لكل ذرة في المواد الصلبة البلورية أن تهتز حول موضع اتزانها كما لو أنّها موصولة بزنبرك مع كل من جيرانها (الشكل د -4). لذا، فيمكن لها أن تمتلك ثلاث درجات من الحرية للطاقة الحركية وثلاث درجات أخرى مرتبطة بطاقة الوضع في كل من الاتجاهات الثلاثة: x ، و y ، و z استنادا إلى القيم المقيسة.

الشكل د – 3 الحرارة النوعية المولية للمواد الصلبة كاقتران في درجة الحرارة.





الشكل د – 4 تستطيع الذرات في المادة الصلبة البلورية الاهتزاز حول مواضع اتزانها كما لو أنها كانت موصولة بجاراتها بوساطة زنبركات. (القوى بين الذرات كهربائية في طبيعتها).

ملحق هـ

تحولات أو تحويلات جاليليو ولورنتز

نختبر الآن بالتفصيل الرياضيات التي تربط الكميات في إطار مرجعي قصوري إلى مثيلاتها في إطار آخر. وبالتحديد، سنرى كيفية تغيّر المواضع والسرعات عند انتقالها من إطار مرجعي إلى آخر.

ونبدأ مع وجهة نظر تقليدية منسوبة إلى جاليليو. خذ في الحسبان إطارين مرجعيين: S و S′ يتميز كل منهما بمجموعة محاور إحداثية (الشكل هـ - 1). يشير المحوران x و y (z غير ظاهر) إلى S، في حين يشيرالمحوران x' و y' إلى S′. ويتداخل المحوران x و x' مع بعضهما. ونفترض أنّ الإطار S′ يتحرك إلى اليمين (في اتجاه x) بسرعة v نسبة إلى S. ونفترض للسهولة تطابق نقطتي الأصل عند الزمن $t = 0$.

وخذ في الحسبان حدثًا يقع عند نقطة ما، ولتكن P (الشكل هـ - 1) ممَثَّلَةً بالإحداثيات x', y', z' في الإطار المرجعي S′ عند الزمن t'. ما هي إحداثيات P بالنسبة إلى S؟ بما أن S و S′ يتداخلان في البداية تحديدا، فإن S′ بعد زمن t، ستكون قد تحركت مسافة vt'. ولذا، عند زمن t'، $x = x' + vt'$. أما المحوران y, z على الوجه الآخر فلم يتأثرا بالحركة على امتداد محور x. وعليه، فإنّ $y = y'$ & $z = z'$. وفي النهاية، بما أنه تم افتراض زمن مطلق وفق فيزياء جاليليو – نيوتن، فإن الساعات في الإطارين ستتفقان مع بعضهما. لذا، $t' = t$. ونلخص هذا في معادلات جاليليو للتحول كالتالي:

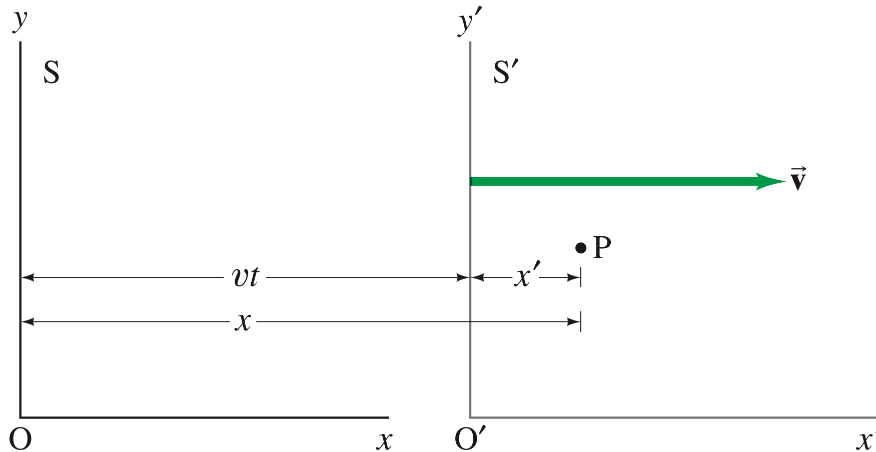
تحولات جاليليو

$$
\begin{aligned}
x &= x' + vt' \\
y &= y' \\
z &= z' \\
t &= t'.
\end{aligned}
\tag{هـ - 1}
$$

وتعطي هذه المعادلات إحداثيات حدث في إطار S عند معرفة إحداثياته في إطار S′. وإذا عرفنا تلك الإحداثيات في النظام S، فسنحصل على إحداثيات S′ من

$$x' = x - vt, \qquad y' = y, \qquad z' = z, \qquad t' = t.$$

هذه المعادلات الأربع هي التحول " المعاكس". ويمكن الحصول عليها بسهولة من مجموعة (المعادلات هـ - 1). لاحظ أن الأثر هو، فقط، استبدال الكميات المعلمة وغير المعلمة وإحلال $-v$ مكان v. وهذا بديهي لأن من الإطار S′، فإن S تتحرك إلى اليسار (اتجاه x السالب) بسرعة v.



الشكل هـ - 1 الإطار المرجعي القصوري S′ يتحرك إلى اليمين بسرعة v بالنسبة إلى الإطار القصوري S.

والآن، افترض أن النقطة P في (الشكل هـ $-$ 1) تمثل جسمًا متحركًا، وافترض أن مركبات سرعتها في هي u'_y، u'_x و u'_z (نستعمل u هنا لنميزها عن السرعة النسبية للإطارين v). والآن $u'_z = \Delta z'/\Delta t'$ بحيث تكون الكميات جميعها كما تم قياسها في الإطار S'. وعلى $u'_x = \Delta x'/\Delta t', \ u'_y = \Delta y'/\Delta t',$. سبيل المثال، إذا كان موضع الجسم عند زمن t'_1 هو x'_1. وبعد ذلك بوقت قصير، t'_2 هو x'_2 فإن

$$u'_x = \frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}.$$

والآن، ستمتلك سرعةُ P كما تشاهد من الإطار S المركبات u_x ، u_y ، u_z ونستطيع معرفة كيفية ارتباط هذه المركبات مع مركبات السرعة في الإطار S' عن طريق استخدام (المعادلات هـ - 1). ومثال ذلك ما يلي:

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{(x'_2 + vt'_2) - (x'_1 + vt'_1)}{t'_2 - t'_1}$$

$$= \frac{(x'_2 - x'_1) + v(t'_2 - t'_1)}{t'_2 - t'_1}$$

$$= \frac{\Delta x'}{\Delta t'} + v = u'_x + v.$$

أمّا بالنسبة للمركبات الأخرى $u'_y = u_y$ و $u'_z = u_z$ فيصبح لدينا

تحولات سرعة جاليليو

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z. \qquad \text{(هـ - 2)}$$

وتُعرف هذه **بمعادلات تحولات سرعة جاليليو**. ونرى أنّ مركبتي السرعة y و z لم تتغيرا، مع أنّ المركبة x اختلفت بمقدار v. وهذا ما استخدمناه قبل ذلك عند التعامل مع السرعة النسبية. وعلى سبيل المثال، إذا كانت S' تمثل قطارا و S تمثّل الأرض، وكان القطار يتحرك بسرعة v بالنسبة إلى الأرض، فإنّ شخصًا ما يتحرك باتجاه مقدمة القطار بسرعة $U'x$ ستكون سرعته بالنسبة إلى الأرض هي $u_x = u'_x + v$

النظرية النسبية

إنّ تحولات جاليليو: (المعادلتين هـ - 1 و هـ - 2) ، صحيحتان فقط عندما تكون السرعات المعنية غير نسبوية (الفصل 26)؛ أي أقلّ بكثير من سرعة الضوء، c. ونستطيع أن نرى، كمثال على ذلك، أنّ المعادلة ثابتة في الأطر القصورية المرجعية جميعها (مسلمة أساسية في نظرية النسبية). أي أنّ سرعة الضوء المنتقل في الإطار S' بسرعة $u'_x = c$ ستكون $c + v$ في الإطار S ، استنادا إلى (المعادلة هـ - 2). في حين تصرّ نظرية النسبية على أن السرعة يجب أن تكون c في الإطار S. لذا، هناك حاجة ماسة إلى مجموعة جديدة من معادلات التحويل للتعامل مع السرعات النسبوية.

وسنشتق المعادلات اللازمة بطريقة بسيطة. وبالنظر إلى (الشكل هـ - 1) مرة أخرى. نفترض أن التحول خطي، ويأخذ الشكل التالي:

$$x = \gamma(x' + vt'), \qquad y = y', \qquad z = z'.$$

أي أنّنا نعدل المعادلة الأولى من (المعادلات هـ - 1) بالضرب في المعامل γ الذي سيتم تحديده لاحقًا. ونفترض بقاء المعادلتين y و z غير متغيرتين لتوقعنا عدم وجود أي تقلص للطول في هذين الاتجاهين. ولن نفترض أي شكل لـ t، ولكن سنشتقه. ويجب أن تمتلك المعادلات العكسية (المقلوبة) الشكل ذاته مع استبدال v بوساطة $-v$. (مبدأ النسبية يفرضها، لأن تحرك S' إلى اليمين بالنسبة إلى S يكافئ تحرك S إلى اليسار نسبة إلى S').

وعليه،

$$x' = \gamma(x - vt).$$

والآن، إذا غادرت نبضة ضوئية نقطة الأصل المشتركة لـ S و S' عند الزمن $t = t' = 0$، فستكون قد انتقلت بعد زمن t على امتداد محور x السيني مسافة (في S) مقدارها $x = ct$، أو (في S') $x' = ct'$.

لذلك، من المعادلات بدلالة x و x' كما ورد :

$$ct = \gamma(ct' + vt') = \gamma(c + v)t'$$
$$ct' = \gamma(ct - vt) = \gamma(c - v)t$$

ونعوض t' من المعادلة الثانية في الأولى لنجد

$$ct = \gamma(c + v)\gamma(c - v)(t/c) = \gamma^2(c^2 - v^2)t/c$$

ونلغي t من الجانبين، ونحل لإيجاد γ حيث

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

والآن، وبعد أن وجدنا γ، فإنّنا بحاجة إلى إيجاد العلاقة بين t و t'. ولنفعل ذلك، نربط $x = \gamma(x' + vt')$ مع $x' = \gamma(x - vt)$:

$$x' = \gamma(x - vt) = \gamma[\gamma(x' + vt') - vt]$$

ونحل لإيجاد t، فنجد أن $t = \gamma(t' + vx'/c^2)$. وباختصار

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(x' + vt')$$

$$y = y'$$
$$z = z'$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$$

(هـ - 3) تحويلات لورنتز

وتدعى هذه **معادلات تحويل لورنتز**. وكان قد اقترحها لورنتز عام 1904 بشكل مغاير نوعًا ما لتفسير النتيجة الخاوية لتجربة مايكلسون – مورلي، ولجعل معادلات ماكسويل تأخذ الصيغة نفسها في أنظمة القصور جميعها. وبعد ذلك بعام، اشتق آينشتاين هذه المعادلات بناءً على نظريته في النسبية. لاحظ أن كلا من المعادلتين السينية x والزمنية t قد عدلتا مقارنة مع تحويل جاليليو. وبالفعل، نشاهد بطريقة مباشرة في المعادلة الأخيرة وكذلك الأولى من قبلها كيفية اندماج إحداثيات كل من الفضاء والزمن.

وقد تمّ الحصول على معادلات السرعة النسبوية الصحيحة. فعلى سبيل المثال، باستخدام المعادلات هـ - 3 (ندع $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$)

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\gamma(\Delta x' + v\,\Delta t')}{\gamma(\Delta t' + v\,\Delta x'/c^2)} = \frac{(\Delta x'/\Delta t') + v}{1 + (v/c^2)(\Delta x'/\Delta t')}$$
$$= \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2}$$

ويمكن الحصول على باقي المعادلات بالطريقة نفسها، ونعرضها هنا كما يلي:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2}$$
$$u_y = \frac{u'_y\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$
$$u_z = \frac{u'_z\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$

(هـ - 4) تحولات السرعة النسبوية

وأول هذه المعادلات هي (المعادلة 26 – 9)، التي استخدمناها في (البند 26 – 11)حيث ناقشنا كيف أن السرعات لا تجمع كما هو متوقع حسب المنطق (طريقة جاليليو)، وذلك بسبب الحد $(1 + vu'_x/c^2)$ ونستطيع الآن أن نرى كيف تتغير و تعتمد كل من مركبتي السرعة الصادية y والعينية z على المركبة السينية x' .

مثال هـ - 1 **تقلص الطول.**

اشتقّ صيغة تقلص الطول (المعادلة $26-2$) من معادلات انتقال لورنتز.

الحل : افرض أنّ جسمًا ما طوله L_0 في حالة سكون على محور x السيني في S. وأنّ نهايتيه عند الإحداثيين x_1 و x_2، بحيث يكون $x_2 - x_1 = L_0$. وستصبح النهايتان عند أيّ لحظة في S'، عند x'_1 و x'_2 كما هو معطى بمعادلات لورنتز للتحويل. الطول المقيس في S هو $L = x'_2 - x'_1$. ويقيس مراقب ما هذا الطول في S' بوساطة قياس x'_2 و x'_1 في الوقت نفسه (في إطار S'). لذلك، $t'_2 = t'_1$. وعندئذ، من (المعادلة هـ - 3) .

$$L_0 = x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(x'_2 + vt'_2 - x'_1 - vt'_1).$$

وبما أن $t'_2 = t'_1$، نجد أن

$$L_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(x'_2 - x'_1) = \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

أو

$$L = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

وهي (المعادلة $26-2$) .

مثال هـ - 2 **اتساع الزمن.**

اشتقّ صيغة اتساع الزمن (المعادلة $26-1$) . من معاملات انتقال لورنتز.

الحل : يقاس الزمن Δt_0 بين حدثين يقعان في الموضع نفسه $(x'_2 = x'_1)$ في S' ليكون $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$. وبما أن $x'_2 = x'_1$، من المعادلة الأخيرة في (هـ - 3). يكون الزمن Δt بين حدثين كما قيس في S كما يلي:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\left(t'_2 + \frac{vx'_2}{c^2} - t'_1 - \frac{vx'_1}{c^2}\right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(t'_2 - t'_1)$$

$$= \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

والتي هي (المعادلة $26-1$) . لاحظ أنّنا اخترنا S' لتكون الإطار الذي يحدث به الحدثان في الموضع نفسه، لتكون $x'_1 = x'_2$، و لتلغى الحدود المحتوية على x'_1 و x'_2.

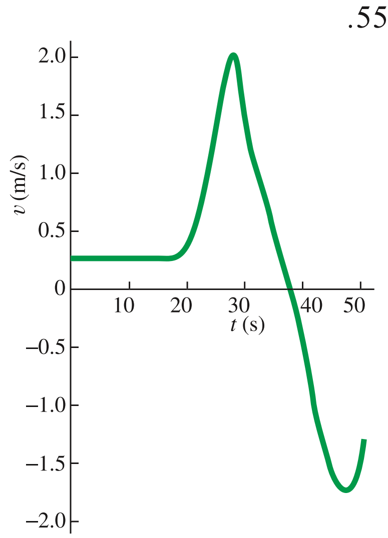
إجابات المسائل الفردية

الفصل 1

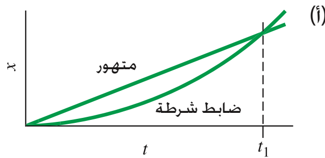
1. (أ) 1.4×10^{10} سنة
(ب) 4.4×10^{17} s.
3. (أ) 1.156×10^{0}.
(ب) 2.18×10^{1}.
(جـ) 6.8×10^{-3}.
(د) 2.7635×10^{1}.
(هـ) 2.19×10^{-1}.
(و) 4.44×10^{2}.
5. (أ) 1%.
7. (أ) 4%.
(ب) 0.4%.
(جـ) 0.07%.
9. 1.7 m.
11. 9%.
13. (أ) 1 ميغافولت.
(ب) 2 ميكرومتر.
(جـ) 6×10^{3} يوم .
(د) 18 ورقة من 100 دولار.
(هـ) 8 قطع منمنمة
15. (أ) 1.5×10^{11} m.
(ب) 150 غيغامتر.
17. 3.8 s.
19. 3.76 m.
21. 7.3%.
23. (أ) 3.80×10^{13} m².
(ب) 13.4
25. $\approx 7 \times 10^{5}$ كتاب
27. $\approx$ 11 hr.
29. 8×10^{4} cm³.
31. 4×10^{8} kg/yr.
33. (أ) لا يمكن أن يكون صحيحًا.
(ب) يمكن أن يكون صحيحا
(جـ) يمكن أن يكون صحيحًا.
35. 50,000 رقيقة.
37. 2×10^{-4} m.
39. (أ) 10^{12} بروتون أو نيوترون
(ب) 10^{10} بروتون أو نيوترون .
(جـ) 10^{29} بروتون أو نيوترون.
(د) 10^{68} بروتون أو نيوترون.
41. 1500 كرة علكة.
43. $\approx$3 ft.
45. $\approx$ 3500 km.
47. 15 m ارتفاع 25 m عرض.
150 m طول.
6×10^{4} m³.
49. 210 yd, 190 m.
51. 49.3 قمر ، 2.21×10^{19} m³
53. (أ) 3%, 3%.
(ب) 0.7%, 0.2%.

الفصل 2

1. 72.3 km/h.
3. 61 m.
5. -2.5 cm/s.
7. (أ) 2.6×10^{2} km.
(ب) 77 km/h.
9. (أ) 4.3 m/s.
(ب) 0 m/s.
11. 2.7 min.
13. 6.8 h, 8.7×10^{2} km/h.
15. 6.73 m/s.
17. (أ) 7.41 m/s².
(ب) 9.60×10^{4} km/h²
19. -5.5 m/s², -0.56 g's.
21. 2.0 m/s², 114 m.
23. 1.8×10^{2} m.
25. 63.0 m.
27. -36 g's.
31. 3.1 s.
33. 51.8 m.
35. (أ) 8.8 s;
(ب) 86 m/s.
37. 15 m/s, 11 m.
39. 5.61 s.
43. 4.1×10^{-2} s.
45. 46 m.
47. (أ) 5.20 s.
(ب) 38.9 m/s.
(جـ) 84.7 m.
49. (أ) 48 s.
(ب) 90s - 108 s.
(جـ) 0 s - 38 s,65 s - 83 s,
90 s -108 s.
(د) 65 s - 83 s.
51. (أ) 0 s - 18 s.
(ب) 27 s.
(جـ) 38 s.
(د) كلا الاتجاهين.
53. (أ) 4 m/s².
(ب) 3 m/s².
(جـ) 0.35 m/s².
(د) 1.6 m/s².
55.



57. (أ) -150 m/s².
(ب) رخيٌ.
59. 1.3 m.
61. (ب) 14 m.
(جـ) 39.4 m.
63. 31 m/s
65. (أ) 8.8 min.
(ب) 7.5 min.
67. 4.9 m/s - 5.7 m/s, 6.0 m/s
- 6.9 m/s. المجال الأصغر للسرعات الابتدائية.
69. 29.0 m.
71. 5.1×10^{-2} m/s².
73. 3.3 min; 5.2 km; 23.3 s, 0.61 km.
75. (أ) 88 m/s.
(ب) 27 s.
(جـ) 1590 m.
(د) 36 s.
(هـ) -177 m/s.
(و) 54 s.
77. (أ)

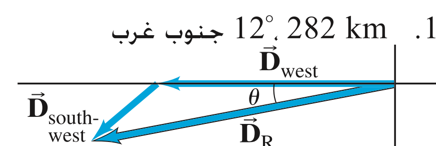


(ب) 23 s.
(جـ) 3.0 m/s².
(د) 67 m/s.
79. 18 m/s.
81. 2.9 برغر /min, 0.44 m/min.
83. 12 m/s.

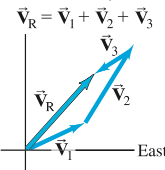
85. (أ) قرب منتصف الفترة الزمنية.
(ب) A.
(جـ) عند اللحظات التي يتقاطع عندها المنحنيان. سرعة الدراجة B عند التقاطع الأول أكبر من سرعة الدراجة A. أماعند التقاطع الثاني فسرعة الدراجة A أكبر من سرعة الدراجة B.
(د) A;
(هـ) لهما متوسط السرعة نفسه.

الفصل 3

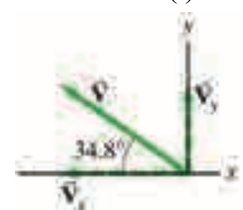
1. 282 km ,12° جنوب غرب



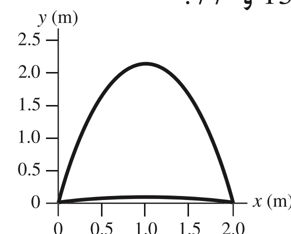
3. $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$
5. 58 m, 48°



7. (أ)



(ب) 8.16 وحدة، -11.7 وحدة;
(جـ) 14.3 وحدة، 34.8° فوق محور $-x$.
9. (أ) 550 km/h, 487 km/h.
(ب) 1650 km, 1460 km.
11. 64.6, 53.1°.
13. (أ) 62.6, 329°.
(ب) 77.5, 71.9°.
(جـ) 77.5, 251.9°.
15. -2450 m, 3870 m, 2450 m; 5190 m.
17. 4.0 m.
19. 13° و 77°.



21. 7.92 m/s.
23. 12.9 m.
25. أبعد بـ 6 مرات
27. 5.71 s.
29. لن تتخطى الطابة العارضة لأنها على ارتفاع 0.76 m وهي على ارتفاع أقل

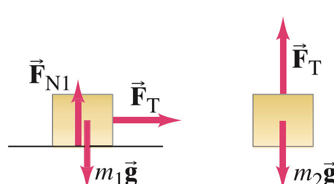
عندما تصل الهدف.
31. (أ) 10.4 s
(ب) 541 m
(جـ) 51.9 m/s, −63.1 m/s.
(د) 81.7 m/s;
(هـ) 50.6° *below the horizon*;
(و) 78.1 m.
33. 76°
35. (أ) 481 m.
(ب) 8.37 m/s أسفل.
(جـ) 97.4 m/s.
37. 1.80 m/s, 19° بالنسبة إلى ضفة النهر.
39. (أ) 2.59 m/s, 28° من الشاطئ.
(ب) 3.60 m باتجاه سريان النهر 6.90 m بعرض النهر.
41. (أ) 543 km, 7.61° جنوب شرق.
(ب) 17 km.
43. 1.41 m/s.
45. (أ) 1.24 m/s.
(ب) 2.28 m/s.
47. (أ) 67 m.
(ب) 170 s.
49. 42.2° شمال غرب.
51. 114 km/h.
53. 6.2°.
55. 2.8 m/s² أسفل. (عكس حركة الشاحنة) 4.7 m/s² يسار.
57. $v_T/\tan\theta$.
59. 180 s, 4.8 km; 21.2 s, 0.56 km.
61. 1.9 m/s².
63. 1.9 m/s, 2.7 s.
65. 49.6°.
67. 63 m/s, 66° فوق الأفق.
69. 108 m/s - 11.0 m/s.
71. (أ) 36 m/s.
(ب) 20 m/s.
73. 7.0 m/s, 97°.
75. 39 m.

الفصل 4

1. 75.0 N.
3. 1.15 × 10³ N.
5. (أ) 196 N, 196 N.
(ب) 294 N, 98.0 N.
7. 68.4 N.
9. 780 N للخلف.
11. 2.00 g's, 9.51 × 10³ N.
13. 5.08 × 10⁴ N, 4.43 × 10⁴ N.
15. 2.5 m/s² أسفل.
17. (أ) 7.4 m/s² أسفل.
(ب) 1.29 × 10³ N.
19. (أ) 47.0 N
(ب) 17.0 N
(جـ) 0 N.
21.



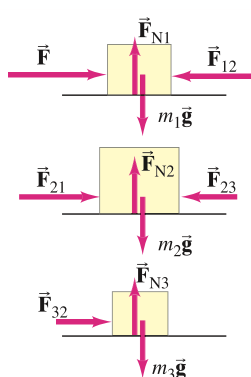
23. 1.41 × 10³ N.
25. (أ) 63 N , 31 N.
(ب) 73 N ,36 N.
27. 6.9 × 10³ N, 8.9 × 10³ N.
29. (أ) 320 N.
(ب) 1.5 m/s².
31. (أ)



(ب) $a = g\dfrac{m_2}{m_1 + m_2}$,

$$F_T = m_1 a = g\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

33. (أ)



(ب) $a = \dfrac{F}{m_1 + m_2 + m_3}$;

(جـ) $F_{1\,net} = \dfrac{m_1 F}{m_1 + m_2 + m_3}$,

$$F_{2\,net} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2 + m_3},$$

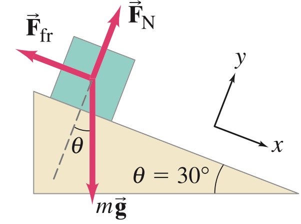
$$F_{3\,net} = \frac{m_3 F}{m_1 + m_2 + m_3};$$

(د) $F_{12} = F_{21} = \dfrac{(m_2 + m_3)F}{m_1 + m_2 + m_3}$,

$$F_{23} = F_{32} = \frac{m_3 F}{m_1 + m_2 + m_3};$$

(هـ) 2.67 m/s²; 32.0 N, 64.0 N, 32.0 N

35. 1.74 m/s^2, 22.6 N, 20.9 N.
37. (أ) 0.98.
(ب) 0.91.
39. 7.8 m/s^2.
41. 73 N, 0.59.
43. (أ)



(ب) لا تغيير.
(جـ) يجب أن يعكس اتجاه قوة الاحتكاك.
45. 40 N.
47. 4.1 m.
49. -7.4 m/s^2.
51. 0.40.
53. (أ) 1.2 m.
(ب) 1.6 s.
55. 101 N, 0.719.
57. (أ) 0.58.
(ب) 5.7 m/s.
(جـ) 15 m/s.
59. 0.36.
61. 5.3 × 10^2 N.
63. (أ) $g\dfrac{(m_1 \sin\theta - m_2)}{(m_1 + m_2)}$
(ب) $m_1 \sin\theta > m_2$ أسفل المستوى
$m_1 \sin\theta < m_2$ إلى أعلى المستوى
65. 1.3 × 10^2 N.
67. 1.3 m
69. 1.54 × 10^3 N.
71. (أ) 16 m/s.
(ب) 13 m/s.
73. نعم، 3.8 m/s.
75. 82 m/s.
77. 5.9°.
79. 940 N, 79° فوق الأفق.
81. (أ) 9.43 × 10^4 N.
(ب) 1.33 × 10^4 N.
(جـ) 1.33 × 10^4 N.
83. 12 m/s.
85. (أ) 45 N (10 lb).
(ب) 37 N (8.4 lb).
(جـ) ليس عندما يسحب عموديا.
87. (أ) 4.1 m/s^2, 3.2 m/s^2.
(ب) 4.1 m/s^2, 3.2 m/s^2.
(جـ) 3.5 m/s^2.
89. 5.3 × 10^2 N, 2.6 × 10^2 N.

الفصل 5

1. (أ) 1.42 m/s^2.
(ب) 35.5 N.
3. 5.97 × 10^{-3} m/s^2, 3.56 × 10^{22} N
الشمس.
5. 0.9 g's.
7. (أ) 3.73 N.
(ب) 9.61 N.
9. نعم، 25 m/s.
11. 30.4 m/s, 0.403 rev/s.
13. 8.5 m/s.
15. 11 rpm.
17. 3.38 × 10^4 rpm.
21. 0.22.
23. $4\pi^2 f^2(m_1 r_1 + m_2 r_2), 4\pi^2 m_2 r_2 f^2$
25. 3.5 × 10^3 N, 5.0 × 10^2 N.
27. (أ) 1.27 m/s.
(ب) 3.05 m/s.
29. (أ) 21.0 kg, 21.0 kg.
(ب) 206 N, 252 N.
31. 4.4 m/s^2.
33. 3.9 kg, 0.1 kg.
35. 2.02 × 10^7 m.
37. 4.38 × 10^7 m/s^2
39. 3.2 × 10^{-8} N نحو مركز المربع.
41. 6.4 × 10^{23} kg.
43. 6.32 × 10^3 m/s.
45. 10s /rev.
47. 7.90 × 10^3 m/s.
49. 2.0 × 10^4 s, 7.1 × 10^4 s.
51. (أ) 21 N نحو القمر.
(ب) 2.0 × 10^2 N بعيدًا عن القمر.
53. (أ) 5.4 × 10^2 N.
(ب) 5.4 × 10^2 N.
(جـ) 7.2 × 10^2 N.
(د) 3.6 × 10^2 N.
(هـ) 0 N.
55. (ب) 5.4 × 10^3 kg/m^3.
57. 1.62 × 10^{11} m.
59. بلوتو، نعم 2690 × 10^6 km.
61. (أ) 1.90 × 10^{27} kg.
(ب) 1.90×10^{27} kg, 1.89×10^{27} kg
نعم، 1.90 × 10^{27} kg
63. 671 ×10^3 km, 1070 ×10^3 km,
1880 × 10^3 km.
65. 9.0 d.
67. 2.64 × 10^6 m.
69. 0.344%.
71. 2.6 m/s^2 للأعلى.
73. (أ) 2.2 × 10^3 m.
(ب) 5.4 × 10^3 N.
(جـ) 3.8 × 10^3 N.
75. (أ) $\theta = \tan^{-1} m_M R^2_{Earth}/M_{Earth} D^2_M$
(ب) 5 × 10^{13} kg.
(جـ) (8 × 10^{-4})°.
77. 5.07 × 10^3 s.
79. 26.9 m/s.
81. كتلة الشمس 2.6 × 10^9, 5.2 × 10^{39}.
83. (أ) 3.86 × 10^3 m/s.
(ب) 4.36 × 10^4 s.
85. (أ) ≈12 h.
(ب) 1.8 × 10^3 m.
87. 5 × 10^{-5} N.m^2/kg^2.
89. 3.8 × 10^{-10} N، للأعلى.
91. 1.6 × 10^{-4} m/s^2.
93. $v_{min} = v_0\sqrt{\dfrac{(1 - \mu_s Rg/v_0^2)}{(1 + \mu_s v_0^2/Rg)}}$,

$v_{max} = v_0\sqrt{\dfrac{(1 + Rg\mu_s/v_0^2)}{(1 - \mu_s v_0^2/Rg)}}$.

الفصل 6

1. 7.27 × 10^3 J.
3. (أ) 9.2 × 10^2 J.
(ب) 5.2 × 10^3 J.
5. 4.9 × 10^2 J.
9. (أ) 1.10 *Mg*.
(ب) 1.10 *Mgh*.
11. 5.0 × 10^3 J.
13. 8.4 × 10^{-2} J.
15. 484 m/s.
17. -1.64 × 10^{-18} J.
19. 44 m/s.
21. 2.25.
23. 1.1 N.
25. (أ) 3.24 × 10^3 N.
(ب) 9.83 × 10^3 J.
(جـ) 7.13 × 10^4 J.
(د) -6.14 × 10^4 J.
(هـ) 8.31 m/s.
27. 82 J.
29. 8.1 × 10^4 N/m.
31. (أ) 9.2 × 10^5 J.
(ب) 9.2 × 10^5 J.
(جـ) نعم.
33. 1.4 m لا، إلا إذا كانت المسافة > 0.7 m.
35. 5.14 m/s.
37. (أ) 9.2 m/s.
(ب) -0.31 m.

39. (أ) 8.3 m/s.

(ب) 3.64 m.

41. $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$

43. 26 m/s, 12 m/s, 20 m/s.

45. 12 Mg/h.

47. 5.3×10^6 J.

49. (أ) 21 m/s.

(ب) 2.4×10^2 m.

51. (أ) 25%.

(ب) 5.4 m/s.

(جـ) حرارة، صوت، تشكيل غير مرن.

53. 23 m/s.

55. 0.40.

57. (أ) 1.1×10^3 km/h.

(ب) 2×10^3 N.

59. 5.5×10^2 N.

61. (ب) 0.10 hp.

63. 2.2×10^4 W, 3.0×10^1 hp.

65. 480 W.

67. 1.0×10^3 W.

69. 18°.

71. 9.0×10^2 W.

73. 1.5×10^3 J.

75. (أ) 2.5r.

(ب) 11 mg.

(جـ) 5 mg.

(د) mg.

77. (أ) $\sqrt{2gL}$

(ب) $\sqrt{1.2gL}$

79. (أ) 2.5×10^5 J.

(ب) 23 m/s.

(جـ) -1.56 m .

81. (أ) 4.0×10^1 m/s.

(ب) 3.0×10^5 W.

83. (أ) 1.4×10^3 m.

(ب) 1.6×10^2 m/s.

85. 4.2×10^4 N.

87. 3.9×10^2 W.

89. 2 k.

91. 4.6 s.

93. (أ) 1×10^2 m/s.

(ب) 4×10^7 W.

الفصل 7

1. 0.24 kg.m/s.

3. 4.40×10^3 N نحو القاذف.

5. 6.0×10^7 N للأعلى.

7. 12.6 m/s.

9. 8×10^2 N, $F_{wind} > F_{fr} \approx 7 \times 10^2$ N.

11. 4.2×10^3 m/s.

13. 6.9×10^3 m/s بعيدًا عن الأرض.

4.7×10^3 m/s بعيدًا عن الأرض.

(ب) 5.9×10^8 J.

15. (أ) 2.0 kg.m/s.

(ب) 5.8×10^2 N.

17. 2.1 kg.m/s نحو اليسار.

19. (أ) 3.8×10^2 kg.m/s.

(ب) -3.8×10^2 kg.m/s.

(جـ) 3.8×10^2 kg.m/s.

(د) 5.1×10^2 N.

21. 69 m.

23. 2.00 m/s شرق، 1.00 m/s غرب.

25. 2.23 m/s و 0.88 m/s كلاهما باتجاه الحركة الابتدائية لكرة التنس.

27. (أ) 3.62 m/s, 4.42 m/s.

(ب) -4.0×10^2 kg.m/s.

4.0×10^2 kg.m/s.

29. 0.35 m, 1.4 m.

31. $v_2 = \sqrt{2}\, v_1$

33. (أ) $-M/(m + M)$.

(ب) -0.96.

35. 23 m/s.

37. $e = \sqrt{h'/h}$

39. (أ) 1.7 m/s لكليهما.

(ب) -2.1 m/s, 7.4 m/s.

(جـ) 0, 4,3 m/s معقول.

(د) 0, 2.8 m/s غير معقول.

(هـ) -4,0 m/s, 10.3 m/s غير معقول.

41. A, 6.7 m/s بالنسبة إلى الصفر 60°.

43. 141°.

45. 39.9u.

47. 6.5×10^{-11} m.

49. (1.040 m, −1.04 m) بالنسبة إلى مركز الطوف.

51. $(1.2l, 0.9l)$ بالنسبة إلى الزاوية اليسرى الخلفية.

53. 17% من الكتلة الكلية للجسم.

55. 7.6 cm عمودي، 21.7 cm أفقي.

57. 4.66×10^6 m من مركز الأرض.

59. 24.8 cm.

61. $vm/(m + M)$ يقف البالون للأعلى.

63. $v'_x = \frac{3}{2}v_0, v'_y = -v_0$

65. (أ) 0.194 m/s.

(ب) 8.8×10^2 N.

67. $m_B = \frac{5}{3}m$

69. 4.00 m.

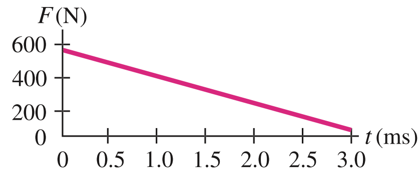
71. 3.8×10^2 m/s.

73. (أ) 2.5×10^{-13} m/s.

(ب) 1.7×10^{-17}.

(جـ) 0.19 J.

75. (أ)



(ب) 0.93 N.s.

(جـ) 4.2×10^{-3} kg.

77. 6.7×10^3 m/s.

79. (أ) -4.4 m/s, 4.0 m/s.

(ب) 2.0 m.

81. -29.6 km/s.

الفصل 8

1. (أ) 0.52 rad, π/6 rad.

(ب) 0.99 rad, 19π/60 rad.

(جـ) 1.57 rad, π/2 rad.

(د) 6.28 rad, 2π rad.

(هـ) 7.33 rad, 7π/3 rad.

3. 5.3×10^3 m.

5. 7.4×10^{-2} m.

7. (أ) 2.6×10^2 rad/s.

(ب) 46 m/s, 1.2×10^4 m/s^2.

9. (أ) 1.99×10^{-7} rad/s.

(ب) 7.27×10^{-5} rad/s.

11. 3.6×10^4 rpm

13. $\omega_1/\omega_2 = R_2/R_1$.

15. 2.8×10^4 rev.

17. (أ) 4.0×10^1 rev/min^2.

(ب) 4.0×10^1 rpm.

19. (أ) -0.42 rad/s^2.

(ب) 210s.

21. (أ) -4.1 rad/s^2.

(ب) 7.6 s.

23. (أ) 41 m·N.

(ب) 29 m·N.

25. $mg(L_2-L_1)$ عقارب الساعة.

27. 1.81 kg·m^2

29. (أ) 0.94 kg.m^2.

(ب) 2.4×10^{-2} m·N.

31. (أ) 6.1 kg·m^2.

(ب) 0.61 kg·m^2.

(جـ) المحور العمودي

33. 20 N.

35. 62 m·N.

37. 993 rev, 10.9 s.

39. (أ) 92 rad/s^2.

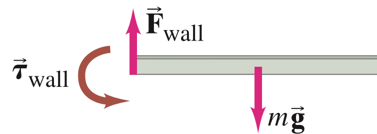
(ب) 7.9×10^2 N.

41. $a = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2 + I/r^2)} g < a_{I=0}$,
$a_{I=0} = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)} g$.
43. 1.40×10^4 J.
45. 56 J.
47. 1.42×10^4 J.
49. 3.22 m/s.
51. 2.64 kg.m²/s.
53. (أ) يزداد القصور الذاتي الدوراني له.
(ب) 1.6.
55. 0.77 kg.m² عن طريق سحب ذراعيها نحو مركز جسمها.
57. (أ) 14 kg.m²/s.
(ب) -2.7 m·N.
59. $\omega/2$.
61. (أ) 1.2 rad/s.
(ب) 1.8×10^3 J, 1.1×10^3 J.
63. 5×10^{-2} rad/s, 2×10^4 KEi.
65. (2.7×10^{-16})%.
67. -0.30 rad/s.
69. 8.21×10^{-6}.
71. 53 m·N.
73. (أ) $\omega_R/\omega_F = N_F/N_R$.
(ب) 4.0.
(جـ) 1.5.
75. (ب) 2.2×10^3 rad/s (جـ) 25 min.
77. (أ) 4.3 m.
(ب) 5.2 s.
79. $Mg\sqrt{2Rh - h^2}/(R - h)$.
81. 2.8 m·N من عضلات ذراعه.
83. (أ) 7.8 kg.m²/s.
(ب) 3.9 m·N.
(جـ) 2.9 rad/s.
85. $2.7R - 1.7r$.

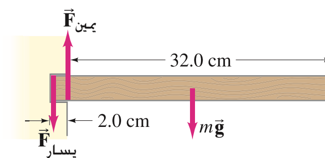
الفصل 9

1. 430 N، 1120° باتجاه عقارب الساعة من $\vec{F}_A$
3. 6.52 kg.
5. 1.1×10^3 N.
7. 5.8×10^3 N, 8.1×10^3 N.
9. (أ) 2.3 m. من الرجل.
(ب) 2.5 m من الرجل.
11. 2.6×10^3 N, 3.1×10^3 N.
13. 0.32 m.
15. 6.1×10^3 N, 5.9×10^3 N.
17. 34.6 N.
19. 9.05×10^{-1} m.
21. (أ) 4.25×10^2 N.
(ب) 4.25×10^2 N, 3.28×10^2 N.

23. (أ) 0.78 N.
(ب) 0.98 N.
25. 55.2 N, 63.7 N.
27. 0.50.
29. 1.0×10^2 N.
31. 9.9×10^2 N.
33. 2.7×10^3 N.
35. 2.4ω.
37. (ب) نعم، بنحو 1/24 من طول الطوبة.
(جـ) $D = \sum_{i=1}^{n} \frac{L}{2i}$
(د) 35 طوبة.
39. (أ) 2.0×10^5 N/m².
(ب) 4.1×10^{-6}.
41. (أ) 1.4×10^5 N/m².
(ب) 6.9×10^{-7}.
(جـ) 6.5×10^{-6} m.
43. 9.6×10^6 N/m².
45. (-2×10^{-2})%.
47. (أ) 1.1×10^2 m·N عقارب الساعة.
(ب) الجدار.



49. (أ) 393 N.
(ب) أسمك.
51. (أ) 4.4×10^{-5} m².
(ب) 2.7×10^{-3} m.
53. 1.2×10^{-2} m.
55. 12 m.
57. 2.94×10^{-1} kg, 2.29×10^{-1} kg.
59. (أ) $Mg\sqrt{h/(2R - h)}$.
(ب) $Mg\sqrt{h(2R - h)}/(R - h)$
61. (أ).



(ب) $F_{يسار} = 3.7 \times 10^2$ N.
$F_{يمين} = 4.2 \times 10^2$ N
$mg = 49$ N.
(جـ) 8.3 m.N.
63. 29°.
65. 7.7×10^{-6} m.
67. (أ) $0.29\, mg$.
(ب) $0.58\, mg$.
(جـ) أفقيًا عند النقطة الأدنى، 60° فوق الأفق عند نقاط الترابط.

69. (أ) $\mu_s < l/2$ h.
(ب) $\mu_s > l/2$ h.
71. (أ) $F_{يسار} = 3.3 \times 10^2$ N أعلى.
$F_{يمين} = 2.3 \times 10^2$ N أسفل.
(ب) 0.65 m.
(جـ) 1.2 m.
73. $F_{يسار} = 1.0 \times 10^2$ N.
$F_{يمين} = 1.9 \times 10^2$ N.
75. متوسط القوة لكل وحدة مساحة $= 4.5 \times 10^5$ N/m².
77. (أ) 3.5×10^8 N/m².
(ب) سوف تكسر العظمة.
(جـ) 8.2×10^6 N/m² لن تكسر العظمة.
79. 2.34 m.

الفصل 10

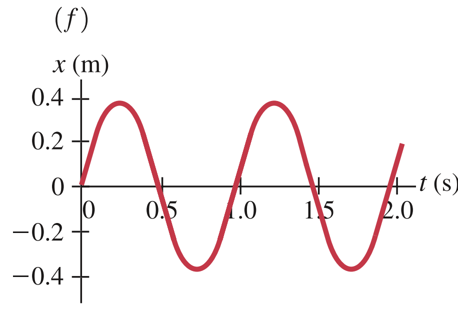
1. 3×10^{11} kg.
3. 5.8×10^2 kg.
5. 0.8477.
7. (أ) 7×10^7 N/m².
(ب) 2×10^5 N/m².
9. (أ) 4.7×10^5 N.
(ب) 4.7×10^5 N.
11. 2.2×10^3 kg.
13. 13 m.
15. 1.60×10^4 m.
17. (أ) 9.6×10^5 N/m².
(ب) 98 m.
19. (أ) 1.41×10^5 Pa.
(ب) 9.8×10^4 Pa.
21. أعلى 1.06×10^3 kg/m³, 3%.
23. 0.199.
25. 920 kg.
27. حديد أو فولاذ.
29. (أ) 7.4×10^5 N.
(ب) 1.0×10^4 N.
31. (أ) 1.03×10^3 kg/m³.
(ب) $\rho_{liquid} = \rho_{object}(m_{object} - m_{apparent})/m_{object}$
33. 0.105.
35. 0.90 m/s.
39. 4.4×10^5 s (5.1 days).
41. 5.6×10^{-3} m³/s.
43. 1.9×10^5 N.
45. 9.7×10^4 Pa (≈ 0.96 atm).
47. (ب) 0.24 m/s.
49. (أ) $2\sqrt{h_1(h_2 - h_1)}$
(ب) $h_1' = h_2 - h_1$

51. الزمن الجديد = 0.13 (الزمن السابق).
53. 9.9×10^2 Pa.
55. 0.9 Pa/cm.
57. (أ) $Re = 2500$. لذلك فهو مضطرب.
(ب) $Re = 5000$. لذلك فهو مضطرب.
59. 3.6×10^{-2} N/m.
61. لا. 8.3×10^{-6} kg أقصى كتلة يمكن تحملها.
63. (أ) 0.75 m.
(ب) 0.65 m.
(جـ) 0.24 m.
65. 150 N - 220 N.
67. 0.047 atm.
69. 0.6 atm.
71. 0.142 m.
73. 1.3×10^2 N.
75. 1.1 m.
77. 0.33 kg.
79. 1.1 W.
81. 4.6 m.
83. (أ) 9.1 m/s.
(ب) 0.26 L/s.
(جـ) 0.91 m/s.
85. 4.0×10^{-4} m³/s.
87. 4.2×10^{-3} Pa·s.

الفصل 11

1. 0.72 m.
3. 1.5 Hz.
5. 3.8 Hz.
7. (أ) 0.16 N/m.
(ب) 2.8 Hz.
9. (أ) 2.5 m/s.
(ب) ±1.6 m/s.
(جـ) 1.8 J.
(د) $x = (0.13\text{ m}) \cos(6.0\pi t)$.
11. $\pm \frac{1}{2} x_0$
13. (أ) 6.0×10^{-2} m.
(ب) 0.58 m/s.
15. (أ) 4.2×10^2 N/m.
(ب) 3.3 kg.
17. $\pm 0.707\, A$.
19. (أ) $y = (0.18\text{ m}) \cos(2\pi t/0.65\text{ s})$.
(ب) 0.16 s.
(جـ) 1.7 m/s.
(د) 17 m/s^2 عند نقطة الانطلاق.
21. (أ) 0.38 m.
(ب) 1.03 Hz.
(جـ) 0.967 s.
(د) 0.92 J.
(هـ) 5.1×10^{-2} J, 0.86 J.

(f)



23. (أ) 0.490s, 2.04 Hz.
(ب) 0.231 m.
(جـ) 37.9 m/s^2.
(د) $y = (0.231\text{ m}) \sin(4.08\,\pi t)$.
(هـ) 3.31 J.
27. 114 N/m, 19.4 m.
29. 0.99 m.
31. (أ) 1.8 s.
(ب) لن يهتز البندول.
33. يقصر طول البندول بنحو 0.7 mm.
35. (أ) -11°.
(ب) 15°.
(جـ) 15°.
37. 1.31 m.
39. (أ) 1.4×10^3 m/s.
(ب) 4.1×10^3 m/s.
(جـ) 5.1×10^3 m/s.
41. 0.35 s.
43. 2.1×10^3 m.
45. 0.99 m.
47. (أ) $4.6 \times 10^9\text{ W/m}^2$.
(ب) 2.3×10^{10} W.
49. 1.73.
51. (أ)



(ب)

(جـ) الطاقة حركية كلها.
53. 441 Hz.
55. 9.7×10^{-2} m.
57. 290 Hz, 580 Hz, 870 Hz.
59. (أ) 1.3 kg.
(ب) 0.32 kg.
(جـ) 5.2×10^{-2} kg.
61. 1.1 m/s.
63. 25°.
65. 44°.
67. 10 min.

69. (أ) 3.2×10^{-2} m.
(ب) 1.5 m.
71. (أ) 1.8×10^4 N/m.
(ب) 0.71 s.
73. 220 Hz.
75. (أ) $1.22\, f$.
(ب) $0.71\, f$.
77. (أ)
G: 784 Hz, 1180 Hz; A: 880 Hz 1320 Hz;
(ب) 1.26;
(جـ) 1.12;
(د) 0.794.
79. (أ) 3.0 m/s.
(ب) $5.0 \times 10^3\text{ m/s}^2$.
81. $\lambda = 4L/(2n-1),\ n = 1, 2, 3, \ldots$
82. الفترة الأفقية أطول بعامل يساوي $\sqrt{1 + l_0 k/mg}$.
85. 6.44 m من مكان نشوء النبضة الأولى.
87. 0.40 s.

الفصل 12

1. 3.4×10^2 m.
3. (أ) 17 cm - 17 m.
(ب) 3.4×10^{-5} m.
5. 55 m.
7. (أ) 8%.
(ب) 4%.
9. 63 dB.
11. 114 dB.
13. (أ) 9×10^{-6} W.
(ب) 1×10^7 نسمة.
15. (أ) 122 dB, 114 dB.
(ب) لا
17. 1.3.
19. 4
21. 25 dB.
23. (أ) 10^9.
(ب) 10^{12}.
25. (أ) 76.6 Hz, 230 Hz, 383 Hz, 536 Hz
(ب) 153 Hz, 306 Hz, 459 Hz, 613 Hz.
27. 8.6 mm - 8.6 m.
29. (أ) 0.18 m.
(ب) 1.1 m.
(جـ) 440 Hz, 0.78 m.
31. -2.6%.
33. (أ) 0.583 m.
(ب) 1.71 m.
35. (أ) 55 Hz.
(ب) 2.0×10^2 m/s.
37. (أ) 248 نغمة توافقية
(ب) 249 نغمة توافقية.

39. ± 0.50 Hz.
41. 28.5 kHz.
43. 3.0 Hz.
45. 444 Hz أو $f_A = 438$ Hz،
445 Hz أو $f_C = 437$ Hz،
7 Hz أو $f_{beat} = 1$ Hz
47. (أ) 130.5 Hz, 133.5 Hz.
(ب) يزداد بـ 2.3% يقل بـ 2.2%.
49. (أ) 1690 Hz.
(ب) 1410 Hz.
51. (أ) 2091 Hz و 2087 Hz.
(ب) 3550 Hz و 2870 Hz.
(جـ) 16,000 Hz و 3750 Hz.
53. 4.32×10^4 Hz.
55. 2 Hz.
57. 0.171 m/s.
59. (أ) 110 m/s.
(ب) 260 m/s.
61. (أ) 120.
(ب) 0.48°
65. 0.3 s.
67. (أ) 57 Hz, 69 Hz, 86 Hz, 110 Hz, 170 Hz.
69. 88 dB.
71. 15 W.
73. 50 dB.
75. (أ) 2.8×10^2 m/s, 48 N.
(ب) 0.195 m.
(جـ) 880 Hz, 1320 Hz.
77. 7.4×10^2 N.
79. 504 Hz.
81. 17 m/s.
83. 2.84 m.
85. 2.29×10^3 Hz.
87. 11.5 m.
89. 34 Hz, 43 Hz, 61 Hz.
91. 10^6.
93. 17 km/h.

الفصل 13

1. 3.3×10^{22} ذرة
3. (أ) 20° C.
(ب) 3300°F.
5. (أ) 5°F.
(ب) -26°C.
7. 4.3×10^{-3} m.
9. 8×10^{-2} m.
11. 981 kg/m^3.
13. 5.12 mL.
15. (أ) -140°C.
(ب) 180°C.
17. (ب) (زيادة 0.57%) 5.7×10^{-3}.
21. (أ) 6.1 cm.
(ب) $\delta L = \frac{V_{0\,\text{bulb}}}{\pi r_0^2}(\beta_{\text{Hg}} - \beta_{\text{glass}})\,\Delta T$
23. 3.5×10^7 N/m^2.
25. (أ) 27°C.
(ب) 4.3×10^3 N.
27. -459.67°F.
29. 1.07 m^3.
31. 1.43 kg/m^3.
33. (أ) 14.8 m^3.
(ب) 1.83×10^5 Pa.
35. 2.40×10^8 Pa.
37. 37°C.
39. 3.43 atm.
41. 2.69×10^{25} molecules/m^3
43. (أ) 7×10^{22} مول.
(ب) 4×10^{46} جزيء.
45. 19 جزيء/نفس.
47. 6×10^3 m/s.
49. 899°C.
51. 25.9°C.
55. 3.9×10^2 m/s.
57. 3.34×10^{-9} m.
61. (أ) صلب أو بخار.
(ب) $5.11\ \text{atm} \le P \le 73\ \text{atm}$, $-56.6°\text{C} \le T \le 31°\text{C}$.
63. 14°C.
65. 91°C.
67. 1.1×10^3 Pa.
69. 3.1 kg.
71. 0.28 s, $v_{\text{diffuse}} = 5.4 \times 10^{-5}$ m/s, $v_{\text{rms}} = 3.1 \times 10^2$ m/s, $v_{\text{diffuse}}/v_{\text{rms}} = 1.7 \times 10^{-7}$.
73. (أ) أقل.
(ب) (1.7×10^{-2})%.
75. 0.21.
77. 260 m/s, 4×10^{-22} atm.
79. 11 L. لا ينصح.
81. 1.65 ،1.29.
83. 1.1×10^{44} جزيء.
85. 15 ساعة.
87. 0.66×10^3 kg/m^3, -3.5%.
89. 1.6×10^{-3} cm.
91. (أ) 2.20×10^3 L.
(ب) 92 min.
(جـ) 30 min.
93. 6.8 كرة/s.
95. (أ) 1.7×10^3 Pa.
(ب) 7.0×10^2 Pa.
97. يقل بـ 6%.
99. 3.0 kg.

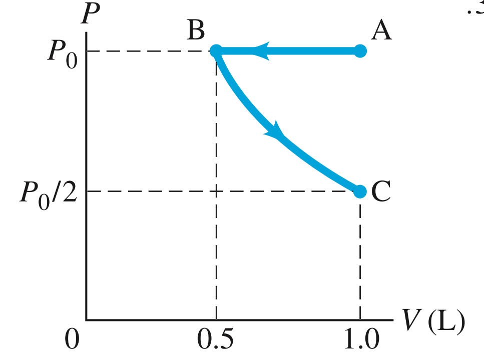
الفصل 14

1. 1.0×10^7 J.
3. (أ) 1.0×10^7 J.
(ب) 2.9 kWh.
(جـ) لا. \$0.29 لكل يوم.
5. 220 kg/h.
7. 100 kcal.
9. 2.0×10^3 J/kg.C°.
11. 401°C.
13. (1.9×10^2)°C.
15. 425 s.
17. 2.3×10^3 J/kg.C°.
19. 0.32C°.
21. 5.0×10^6 J.
23. 1.3 kg.
25. 9.90×10^{-3} kg.
27. 4.7×10^3 kcal.
29. 1.12×10^4 J/kg.
31. 1.7 g.
33. 83 W.
35. (أ) 95 W.
(ب) 33 W.
37. 23 مصباحا.
39. (1.6×10^2)°C.
41. 10°C.
43. (ب) $\frac{Q}{t} = A\frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{n} l_i/k_i}$
45. 6.4 كالوري.
47. 4×10^{15} J.
49. (أ) 3.2×10^{26} W.
(ب) 1.1×10^3 W/m^2.
51. 0.80°C.
53. (أ) 46 W.
(ب) 7.3×10^3 W.
55. 20 W. فقط نحو 9% من معدل الحرارة التي يجب أن يفقدها.
57. (أ) 44 C°.
(ب) لن تنصهر الرصاصة.
59. 4.1 g/h.
61. (أ) 1.2×10^{18} J.
(ب) $Q_{\text{Sun}} = 1.3 \times 10^4\, Q_{\text{interior}}$
63. خليط من الماء والبخار عند درجة الحرارة 100°C بحيث تساوي كتلة الماء ضعفي كتلة البخار.

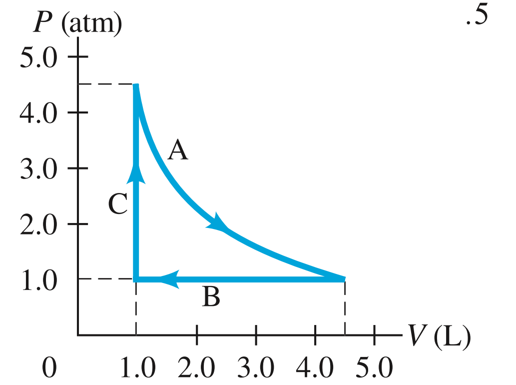
65. (أ) 3.1×10^7 J.
(ب) 3.3×10^3 s.

الفصل 15

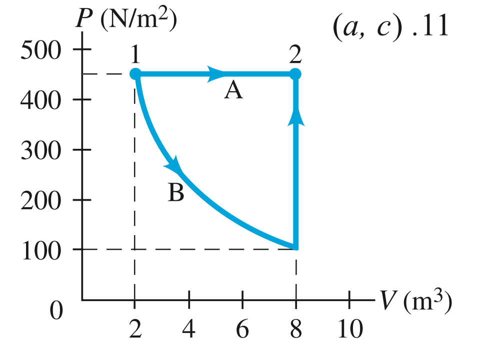
1. (أ) 0 J.
(ب) 3.40×10^3 J.
3.



5.



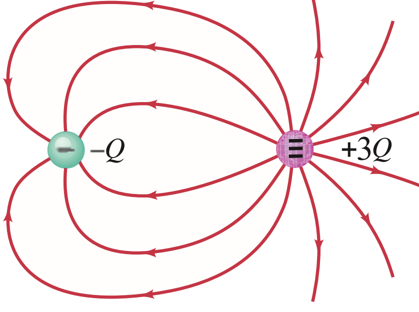
7. (أ) 0 J.
(ب) 1850 J.
(جـ) rise.
9. -4.0×10^2 K.
11. (a, c)



(ب) 2.73×10^3 J, 4.10×10^3 J.
(د) 4.10×10^3 J.
13. (أ) 25 J.
(ب) 63 J.
(جـ) -95 J.
(د) -120 J.
(هـ) -15 J.
15. 162 W.
17. 0.28.
19. 0.23.
21. 1.6×10^{13} J/h.
23. 440°C
25. 9.0×10^2 MW(MJ/s).
27. 250°C.
29. 5.7.
31. -21°C.
33. 76 L.
35. -1.5×10^3 J/K.
37. -1.22×10^6 J/K.
39. 0.15 J/K.
41. $4.35 \times 10^{-2} \frac{\text{J/K}}{\text{s}}$
43. 1.1 J/K.
45. (أ) 1/9.
(ب) 1/18.
47. (أ) 5/16.
(ب) 1/64.
49. (أ) 1.32×10^6 kWh.
(ب) 7.09×10^4 kW.
51. نعم. المحرك المقترح يعمل بكفاءة أعلى من الكفاءة المثالية.
53. (أ) 4.0×10^4 J/s.
(ب) 1.6×10^5 J/s.
(جـ) 220 s.
55. (أ) 0.077.
57. (أ) 45°C.
(ب) 0.58 J/K.
59. 0.24.
61. (أ) $\frac{1}{2}(P_C + P_A)(V_C - V_A)$.
(ب) $P_A(V_C - V_A)$.
(جـ) $P_C(V_C - V_A)$
63. (أ) 5.3C°.
(ب) 77 J/kg·K.
65. 200 J.
67. 180 W.

الفصل 16

1. 13 N
3. 2.7×10^{-3} N
5. 5.5×10^3 N
7. 4.88 cm
9. -5.4×10^7 C
11. (أ) $q_1 = q_2 = 0.5Q_T$
(ب) $q_1 = 0$, $q_2 = Q_T$
13. الشحنة العلوية: 83.7 N, 90° الشحنة السفلية إلى اليسار: 83.7 N 210° الشحنة السفلية إلى اليمين: 83.7 N, 330°
15. 2.96×10^7 N . نحو مركز المربع
17. $\vec{F}_1 = 0.30$ N at 265°, $\vec{F}_2 = 0.26$ N at 139°, $\vec{F} = 0.26$ N at 30°
19. 0.37 l, 0.40 Q_0 من $-Q_0$ باتجاه $-3Q_0$
21. (أ) 22.1×10^{-6} C , 69.9×10^{-6} C
(ب) 104.4×10^{-6}C
-14.4×10^{-6}C
23. 3.78×10^{-16} N غرب
25. 9.5×10^5 N/C . أعلى
27. 1.32×10^{14} m/s^2 اتجاه التسارع معاكس لاتجاه المجال
29.

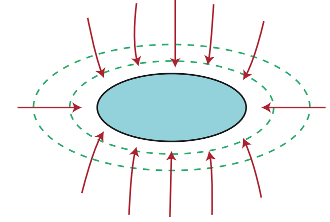


31. 6.54×10^{-10} N/C جنوبًا.
33. 4.70×10^6 N/C at 45°
35. $\frac{4kQxa}{(x^2-a^2)^2}$. إلى اليسار
37. (أ) 240° $\frac{\sqrt{3}\,kQ}{l^2}$
(ب) 330°, $\frac{kQ}{l^2}$
39. 1/4
41. (أ) 7.49×10^6 m/s
43. 1.28×10^{-8} C
45. (أ) -1.1×10^5 N.m^2/C
(ب) 0
47. 1.15×10^{-9} C
49. (أ) 0;
(ب) 0;
(جـ) 3.27×10^3 N/C
(د) 8.74×10^2 N/C
(هـ) ليس هناك اختلاف
51. (أ) 4.6×10^{-10} N
(ب) 7.1×10^{-10} N
(جـ) 6×10^{-5} N
53. $1/(3.5 \times 10^9)$
55. 6.8×10^5 C . سالب
57. 1.0×10^7 شحنة الإلكترون
59. 2.1×10^{-10} m
61. (أ) 0.115 m
(ب) 2.14×10^{-8}s
63. $\frac{1.08 \times 10^7}{[3.00-\cos(12.5t)]^2}$ N/C للأعلى
65. 5×10^{-9} C
67. 7.8×10^{-7} C . موجب
69. -7.0×10^8 C . 0 C
71. لا. $x = \frac{d}{\sqrt{2}-1} \approx 2.41d$
73. -7.66×10^{-6}C . غير مستقر

الفصل 17

1. 4.2×10^{-4} J
3. 3.7×10^{-15} J, 2.3×10^4 eV
5. 3.8×10^4 V/m
7. 3.0×10^{-2} m
9. 7×10^{-5} m

.11 (أ).1.6×10^{7} m/s
(ب) 3.4×10^{7} m/s
.13 1.63×10^{7} m/s
.15 2.1×10^{-9} C
.17



.19 $\frac{\sqrt{2KQ}}{2L}$
.21 4.8×10^{3} m/s
.23 6.9×10^{-18} J
.25 4.2×10^{6} V
.27 (أ) 27 V
(ب) 2.2×10^{-18} J، 14 eV
(جـ) -2.2×10^{-18} J ،-14 eV
(د) 2.2×10^{-18} J ، 14 eV
.29 (أ) 3.6×10^{-2}V
(ب) 2.5×10^{-2} V
(جـ) -2.5×10^{-2} V
.31 2.9×10^{-6} F
.33 7.9×10^{-13} F
.35 5.0×10^{7} m^{2}
.37 2.63×10^{-8} C
.39 4.5×10^{4} V/m.
.41 $C_{2.50}$: 712 V, 1.78×10^{-3} C
$C_{6.80}$: 712 V, 4.84×10^{-3} C.
.43 1.5×10^{-10} F
.45 4.82×10^{-9} F, 0.283 m^{2}
.47 9.6×10^{-5} F
.49 (أ) 7×10^{-12} F
(ب) 7×10^{-11} C
(جـ) 200 V/m
(د) 3×10^{-10} J
(هـ) المواسعة، الطاقة، الشحنة
.51 (أ) أربعة أضعاف
(ب) ضعيفة
.53 2.9×10^{5} V/m
.55 (أ) 6.3 KeV
(ب) 42.8: 1
.57 1.0×10^{-7} J/m^{3}
.59 620 V
.61 (أ) 11 cm من الشحنة السالبة، على الجانب المقابل للشحنة السالبة من الشحنة الموجبة
(ب) 0.7 cm من الشحنة السالبة، على جانب الشحنة السالبة نفسه كما الشحنة الموجبة: 5.2 cm من الشحنة السالبة على الجهة المقابلة للشحنة السالبة من الشحنة الموجبة
.65 6.5°

.67 لا. 9×10^{-16} m
.69 (أ) 23 J
(ب) 3.4×10^{5} W
.71 1.03×10^{6} m/s
.73 2.5×10^{-10} C
.75 (أ) 4.2×10^{-11} C
(ب) 4.2×10^{-11} C
(جـ) 18 V
(د) 1.3×10^{-10} J
.77 (أ) 2.7×10^{3} m/s
(ب) 2.2×10^{3} m/s

الفصل 18

.1 8.13×10^{18} إلكترون/ ثانية
.3 5.5×10^{-11} A
.5 950 V
.7 (أ) 25 A
(ب) 7.5×10^{4} C
.9 2.8×10^{-3} V
.11 (أ) 20 Ω
(ب) 430 J
.13 3.3×10^{-2} Ω
.15 نعم، قطر التنجستن = 4.6 mm
.17 22 C°
.19 1800 °C
.21 (أ) 3.8×10^{-4} Ω
(ب) 1.5×10^{-3} Ω
(جـ) 6.0×10^{-3} Ω
.23 58.3°C
.25 R_{carbon}= 2090 Ω
$R_{Nichrome}$= 2610 Ω
.27 0.96 W
.29 (أ) 190 Ω، 0.63 A
(ب) 33 Ω، 3.7 A.
(أ) 850 W
(ب) 17 Ω
(جـ) 12 Ω
.33 0.14 kWh، 20 سنتاً/ شهرياً
.35 (أ) 6.7 Ω ، 1.4 W
(ب) 4
.37 18 مصباحاً
.39 7500 W
.41 (أ) 10 A
(ب) 1.2 Ω
.43 0.39 A، 0.55 A
.45 390 V
.47 (أ) 4500 W
(ب) 13 A
.49 5.1×10^{-10} m/s
.51 2.6 A/m^{2} شمالاً
.53 35 m/s
.55 5.4×10^{-9} W
.57 6.2 A

.59 2.9×10^{-4} m
.61 1200 $، لكل ساعة لكل متر
.63 1/4
.65 3.8×10^{-3} m
.67 (أ) 1500 W
(ب) 12 A
.69 2: 1
.71 (أ) 26 Ω
(ب) 26 s
(جـ) 0.17 سنتاً
.73 2.58×10^{-4} m، 38.8 m
.75 1.4×10^{12} بروتون
.77 1.8×10^{-4} m
.79 (أ) I_A= 0.33 A، I_B= 3.3 A
(ب) R_A= 360 Ω، R_B= 3.6 Ω
(جـ) Q_A= 1.2 × 10^{3} C
Q_B= 1.2 × 10^{4} C
(د) E_A= E_B = 1.4 × 10^{5} J
(هـ) B
.81 1.34×10^{-4} Ω
.83 2200°C

الفصل 19

.1 (أ) 8.41 V
(ب) 8.49 V
.3 0.11 Ω ، 0.048 Ω
.5 60 Ω ، 960 Ω
.7 9.3 V
.9 (أ) 2820 Ω
(ب) 300 Ω
.11 720 Ω جميعها على التوالي، 80 Ω جميعها على التوازي، 360 Ω (اثنتان على التوازي، على التوالي مع الثالثة)، 160 Ω (اثنتان على التوالي على التوازي مع الثالثة)
.13 (أ) 14 V
(ب) 6.9 Ω ، 28 Ω
.15 27 Ω
.17 (أ) 840 Ω
(ب) V_{470}= 6.7 V
V_{680}= V_{820} = 5.3 V
.19 (أ) V_1، V_2، يزداد
V_3، V_4، يقل
(ب) I_1، I_2، يزداد
I_3، I_4 ، يقل
(جـ) يزداد
(د) قبل: I_1 = 0.117 A، I_2 = 0
I_3 = I_4 = 0.059 A
بعد: I_1 = 0.132 A
نعم، I_2 = I_3 = I_4 = 0.044 A

21. (أ) V_{left} يقل، V_{middle} يزداد، V_{right} يقترب من 0
(ب) I_{left} يقل، I_{middle} يزداد، I_{right} يقترب من 0
(جـ) يزداد
(د) 14.1 V
(هـ) 14.3 A
23. 0.41 A
25. (أ) -25.7 V
(ب) $V_{80} = 77.4$ V، $V_{45} = 43.3$ V
27. $I_1 = 0.68$ A، يسار؛ $I_2 = 0.40$ A، يسار
29. $I_1 = 0.13$ A، يمين
$I_2 = 0.31$ A، يسار
$I_3 = 0.18$ A، أعلى
31. 2 Ω: 0.26 A, 6 Ω: 0.028 A
8 Ω: 0.29 A, 10 Ω: 0.26 A
12 Ω: 0.29 A
33. 1.30 A
35. (أ) 28.2 μF
(ب) 0.78 μF
37. 3.71 μF
39. 7300 pF، نعم
41. $C_1 + \frac{C_2C_3}{C_2 + C_3}$
43. $Q_1 = 48.0\ \mu C$, $Q3 = 24.0\ \mu C$; $V_1 = 3.00$ V, $V_2 = 1.50$ V, $V_3 = 1.50$ V; $V = 3.00$ V.
45. (أ) $V_{0.40} = 5.4$ V, $V_{0.60} = 3.6$ V; (ب) $Q_{0.40} = Q_{0.60} = 2.2 \times 10^{-6}$ C; (جـ) $V_{0.40} = V_{0.060} = 9.0$ V, $Q_{0.40} = 3.6 \times 10^{-6}$ C, $Q_{0.60} = 5.4 \times 10^{-6}$ C.
47. 500 pF، على التوازي
49. 1.0×10^{6} Ω
51. 9.3×10^{-2} s
53. 7.5×10^{-2} Ω
55. (أ) 5.0×10^{-5} Ω، على التوازي
(ب) 5.0×10^{6} A على التوالي
57. 1000 Ω على التوالي، 100 Ω/V
59. 5.52×10^{-3} A
61. 10 V
63. 10.4 V، 2.6 Ω
65. (ب) 140 Ω، 290 Ω
67. 7×10^{-3} A.
69. 1.1×10^{-5} Ω.
(أ) $R_x = R_2R_3/R_1$.
(ب) 65.7 Ω.
73. 4 C، $\frac{5}{2}$ C، $\frac{4}{3}$ C، C، $\frac{3}{4}$ C، $\frac{3}{5}$ C، $\frac{2}{5}$ C، $\frac{1}{4}$ C
75. 50.1 V، 1.25 Ω
77. هناك إجابتان لأن اتجاه التيار خلال المقاومة 4.0-kΩ إلى غير معلوم.
52.3 V, -28.3 V
79. (أ) 6.7×10^{-5} A، للأعلى
(ب) -16 V

81. (أ) 3.3 Ω
(ب) 2.2 V
83. 100 Ω
85. (أ) 7.6 Ω
(ب) 0.33 A
(جـ) 0.33 A
(د) 0.95 W
87. 7.2 Ω

الفصل 20

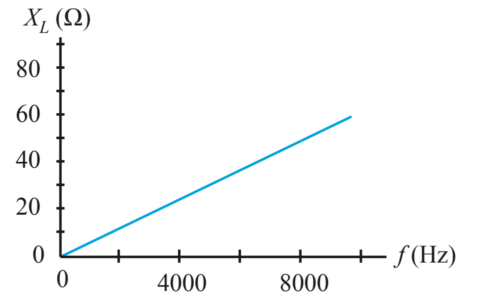
1. (أ) 7.6 N/m
(ب) 5.3 N/m
3. 1.95 A
5. 0.264 T
7. (أ) القطب الجنوبي
(ب) 4.1 A
(جـ) 6.4×10^{-2} N
9. 1.3 T
11. (أ) يسار
(ب) يسار
(جـ) للأعلى
(د) للداخل
(هـ) لا توجد قوة
(و) للأسفل
13. حركة دائرة مع اتجاه عقارب الساعة بنصف قطر 2.77×10^{-5} m
15. 1.6 T، غرب
17. (أ) 2.7×10^{-2} m
(ب) 3.8×10^{-7} s
23. 6.20×10^{-7} m
25. (أ) 45°
(ب) 3.5×10^{-3} m
27. 69 A
29. 13 A، للأعلى.
31. 2.5 A
33. 1.1×10^{-4} T up
35. 4.1×10^{-5} T، 11° تحت الأفق
37. (أ) $(2.0 \times 10^{-5}$ T/A$)$ $(I$ -15A$)$
(ب) $(2.0 \times 10^{-5}$ T/A$)(I + 15$ A$)$
39. السلك القريب: 4.5×10^{-2} N
تجاذب السلك البعيد: 2.2×10^{-2} N
تنافر: 2.2×10^{-2} N
41. 2.6×10^{-6} N، نحو السلك المستقيم
43. 4.1×10^{-5} T
45. M: 5.8×10^{-4} N/m, 90°
N: 3.4×10^{-4} N/m, 300°
P: 3.4×10^{-4} N/m, 240°
47. الاتجاه y، $\frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{d - x}\right)$
49. 94.3 A
51. قصير وسميك
55. 61.6 μA
57. 0.88
59. (أ) 4.01×10^{-5} m.N

(ب) شمال
61. 74 u، 73 u، 72 u، 70 u
63. 2.5 m
65. 41 T
67. 3.0 T، للأعلى
69. 0.25 N شمالاً 68° فوق الأفق
71. 1.12×10^{-6} m/s، غرب
73. 1.6 A، للأسفل
75. (أ) $\frac{I\,lB}{m}r$
(ب) $\left(\frac{I\,lB}{m}\ \ \mu_k g\right)r$
(جـ) شرق
77. (ج) 48 MeV
79. 9.1° سوف يفقدون الأنبوب الثاني.
81. 1×10^{9} A
83. (أ) 2.1×10^{-3} T
(ب) خارج من المستوى الذي تشكله السرعة والمجال الكهربائي
(جـ) 5.8×10^{7} Hz
85. 1.3×10^{4} لفة
87. 3.3×10^{-4} m، 5.3×10^{-5} m

الفصل 21

1. -420 V
3. نحو اليسار
5. 8.5×10^{-2} V
7. (أ) 8.8×10^{-3} Wb
(ب) 55°
(جـ) 5.1×10^{-3} Wb
9. (أ) مع اتجاه عقارب الساعة
(ب) عكس اتجاه عقارب الساعة
(جـ) مع اتجاه عقارب الساعة
(د) لا يوجد تيار مستحث
11. (أ) 6.1×10^{-2} V
(ب) مع اتجاه عقارب الساعة
13. (أ) مع اتجاه عقارب الساعة
(ب) 4.3×10^{-2} V
(جـ) 1.7×10^{-2} A
15. 0.548 N
17. (أ) 0.17 V
(ب) 6.1×10^{-3} A
(جـ) 6.4×10^{-4} N
19. 5.86 C
21. 28 V
23. 2.08 rev/s
25. (أ) 99.0 A
(ب) 1.3×10^{-2} m^2
27. 100 V
29. 13 A
31. 2.67، 0.375، خفض
33. 4.8 V، 50
35. (أ) رفع
(ب) 2.8
37. (أ) 48 kV (rms)
(ب) 0.056

7.7 V .39
0.14 H .41
1.7×10^{-2} H (أ) .43
(ب) 81 لفة
$\mu_0 N_1 N_2 A/l$ .45
29 J .47
5.1×10^{15} J .49
2.3 (أ) .51
4.6 (ب)
6.9 (جـ)
368 Ω (أ) .53
2.21×10^{-2} Ω (ب)
9.90 Hz .55
.57



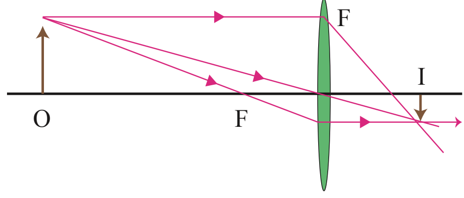
4.97×10^{-2} H .59
30 kΩ (أ) .61
31 kΩ (ب)
1700 Ω .63
8.78 kΩ ،-7.62° ، 8.26×10^{-2} A .65
6.65×10^{-2} A (أ) .67
4.19° (ب)
119.7 V، 8.77 V (جـ)
3.63×10^{5} Hz .69
1.32×10^{-7} F (أ) .71
34.1 A (ب)
7.05×10^{-3} J .73
280 kV .75
41 kV (أ) .77
3.1×10^{7} W (ب)
8.8×10^{5} W (جـ)
3.0×10^{7} W (د)
.81 ضع محث 120-mH على التوالي مع الجهاز
102 V .83
0.10 H .85
7.5×10^{-2} H، 14 Ω .87
2.5×10^{-6} H ، 2.9×10^{-2} Ω(ب) .89

الفصل 22

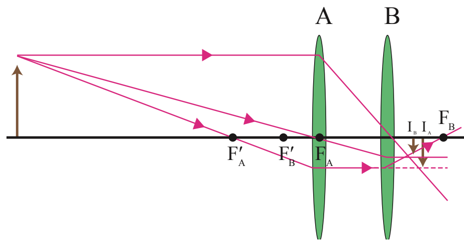
7.9×10^{14} V/m/s .1
5.25 V/m .3
1.88×10^{10} Hz .5
3.11×10^{-7} m .7 ، فوق البنفسجية
499 s (8.31 min) .9
4.0×10^{16} m .11
261 s (أ) .13
1260 s (ب)
2.1×10^{6} rev/s .15
.17 الطول الموجي
3.54×10^{-15} s ، 9040
1.21×10^{7} s (≈ 140 يوم) .19
0.95 W/m^2 ، 19 V/m .21
3.80×10^{26} W .23
280 J (أ) .25
2.6×10^{9} V/m (ب)
3.41 m - 2.78 m (أ) .27
561 m - 176 m (ب)
.29 AM أطول بنحو 100 مرة
330 pF .31
2.6×10^{-9} H - 3.9×10^{-9} H .33
1.5 V/m .35
499 s (8.31 min) .37
1.28 s (أ) .39
260 s (4.3 min) (ب)
0.07 V/m (أ) .41
8 km (ب)
469 V/m .43
150 m (أ) .45
75 m (ب)
1.8×10^{-10} J (أ) .47
8.7×10^{-6} V/m، 2.9×10^{-14} T (ب)
(أ) التوازي .49
8.9 pF - 11 pF(ب)
1.1 mH (جـ)
4.0×10^{-7} J (أ) .53
1.2×10^{-2} V/m (ب)
1.2×10^{-2} V (جـ)

الفصل 23

5.0 m .1
5° .3
5.9×10^{-6} m^2 .5
36.0 cm .7
.9 2.09 cm خلف السطح الأمامي للكرة. معتدل، وهمي
.11 مقعرة، 5.66 cm
1.0 mm (جـ) ،-6.7 cm (ب) .13
(أ).15 عند مركز الانحناء
(ب) حقيقي
(جـ) مقلوب
-1 (د)
(أ) محدبة .21
(ب) 22 cm خلف المرآة
-98 cm (جـ)
-196 cm (د)
1.97×10^{8} m/s (أ) .23
1.99×10^{8} m/s (ب)
2.21×10^{8} m/s (جـ)
1.49 .25
64.0° .27
46.8° .29
4.6 m .31
81.1° .33
1.35 .37
$n \geq 1.5$ .39
(أ) .43

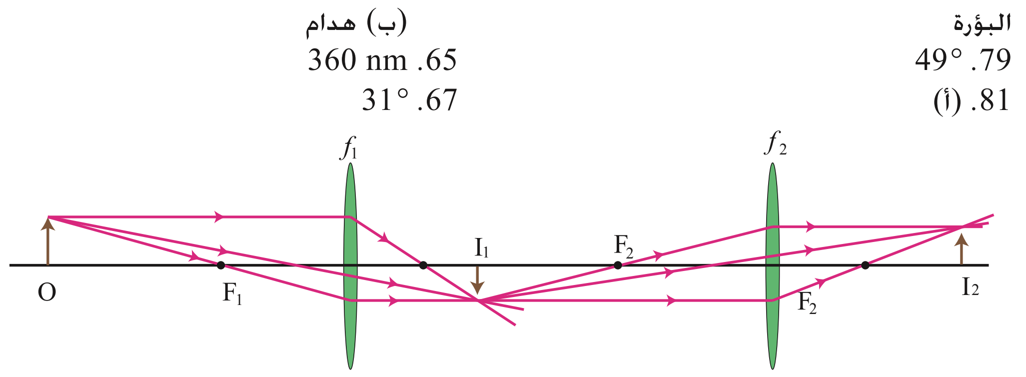


390 mm (ب)
.45 عدسة لامة ، 41.1 cm، حقيقي
-72 cm (أ) .47
4.0 (ب)
80.6 mm (أ) .49
82.2 mm (ب)
87.0 mm (جـ)
(د) واحدة عند 24 cm
(أ) 3.0 cm بعيدًا عن العدسة .51
(ب) 0.5 cm باتجاه العدسة
75.0 mm (أ) .53
25.0 mm (ب)
(أ) 15.2 cm ، -2.54 mm .55 حقيقي ومقلوب
(ب) -12.1 cm ،2.02 cm، وهمي ومعتدل
49.2 cm، 16.8 cm .57
.59 7.41 cm خلف العدسة المفرقة
(أ) 7.14 cm .61 إلى يمين العدسة B
-0.357 (ب)
(جـ)



(أ) 16 cm .63 إلى يسار العدسة اللامة
(ب) 1.8 cm إلى يمين العدسة المفرقة
1.54 .67
-36.1 cm .69
5.6 m .71
5.16 m .73
$r = \infty$ (أ) .75
$d_o = -d_i$ (ب)
+1 (جـ)
(د) نعم
.77 الجسم وهمي وأقرب إلى العدسة من

البؤرة
49° .79
(أ) .81



(ب) 21 cm إلى يمين العدسة الثانية.
0.65
0.106 m ، 2.7 m .83
.85 حقيقي ومعتدل، حقيقي ومعتدل
(أ) قطره 0.26 mm .87
(ب) قطره 0.47 mm
(جـ) قطره 1.3 mm
(د) 0.56، 2.7
20.0 cm .89
7.5 cm، 10 cm .91
20.0 cm .93، عدسة لامة

الفصل 24

4.9×10^{-7} m .1
6.2×10^{-7} m ، 4.8×10^{14} Hz .3
1.4×10^{-4} m .5
610 nm .7
.9 يعكس النمط الاعتيادي للشق الثنائي
2.7×10^{-3} m .11
533 nm .13
0.22° .15
1.51° .17
2.51 m .19
3.6×10^{-6} m .21
9.53×10^{-7} m .23
2.6 cm .25
4.43° .27
1640 cm/خط .29
2.20×10^{-6} m، 53.3° .31
534 nm، 612 nm، 760 nm .33
7140 cm/خط .35
5.79×10^{5} cm/خط .37
643 nm .39
169 nm .41
8.5×10^{-6} m .43
113 nm ، 225 m .45
471 nm .47
699 nm .49
2.50×10^{-4} m .51
0.089 .53
61.2° .55
.35.3° (أ) .57
(ب) 63.4°
44.5% .59
$0.031 I_0$ .61
(أ) بناء .63

(ب) هدام
360 nm .65
31° .67
590 nm .69
.71 الأطوال الموجية من 600 nm إلى 700 nm لطيف الدرجة الثانية تتراكب مع الأطوال الموجية من 400 nm إلى 467 nm التي لطيف الدرجة الثالثة
0.7 m .73
810 nm .75
160 nm، 320 nm .77
36.9° .79
(أ) 0.086 .81
(ب) لا شيء
48 km .83
240 nm .85
(أ) 4.8° .87
(ب) 8.7°

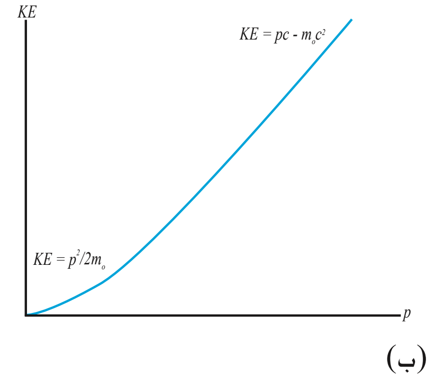
الفصل 25

2.5 mm - 39 mm .1
$1/62.5$ s ≈ $1/60$ s .3
17 mm .5
50 mm .7
0.16 s .9
.11 يجب أن تكون النظارات أفضل
$-8.3\ D$، $-7.1\ D$ .13
(أ) قصر النظر. (ب) 20.6 cm .15
0.2 cm .17
(أ) 2.0 cm؛ (ب) 1.9 cm .19
2.1 .21
(أ) 17 cm؛ (ب) 10 cm .23
(أ) 3.63؛ (ب) 12.0 mm؛
(جـ) 6.88 cm
(أ) -64 cm؛ (ب) 3.3 x .27
-27، 79 cm .29
22 cm .31
-110× .33
-94× .35
f_o=124 cm ، f_e=0.76 cm .37
480× .39
610× . .41
(أ) 0.85 cm؛ (ب) 230× . .43
(أ)137×؛ 14.4 cm . .45
(ج) 1.7 cm ؛ (د) 0.71 mm.
9.1 cm، 6.1×10^{-6} rad .49
1.7×10^{11} m .51
.53 نعم

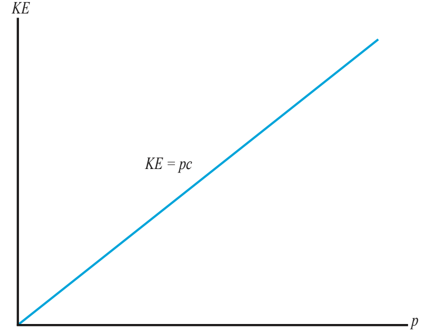
.0.245 nm .55
(أ).57 1؛
(ب) 2.7 - 1.
.16 .59
.100 mm ، 200 mm .61
.63 4.1× ، 2.9×، الشخص ذو العين الطبيعية.
(أ) -2.3× .65
(ب) +4.5 D
.34 cm .67
-19× .69
(أ) عدسات: 4.0-cm، -11×، 48 cm .71
(ب) 180 cm
.1.7 m .73

الفصل 26

.42.6 m .1
(أ) 2.2×10^{-9} - 1؛ .3
(ب) 0.9998؛
(ج) 0.980؛
(د) 0.31؛
(هـ) 0.20؛
(و) 0.0447.
.2.32×10^{8} m/s .5
26 سنة .7
.7×10^{-8}% .9
(أ) 2.7 سنة .11
(ب) 9.2 سنة
(أ) 1.25 m، 6.39 m .13
(ب) 15.0 s؛
(ج) $0.660c$؛
(د) 15.0 s.
.8.1×10^{-19} kg.m/s .15
$0.38c$ .17
(أ) 310% .19
(ب) 140%
4×10^{-28} kg .21
938 MeV/c^2 .23
9.0×10^{13} J، 3.7×10^{10} kg .25
$0.60c$ .27
942 MeV، 1630 MeV/c .29
$0.437c$ .31
$0.30c$ .33
(أ) $0.866c$ .35
(ب) $0.745c$
(أ) 5.5×10^{19} J .37
(ب) 3.3%
237.0483 u .39
(أ) .41



(ب)

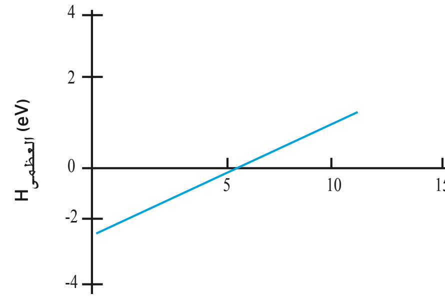


$0.80c$ .43
$0.98c$ (أ) .45
$0.42c$ (ب)
$0.92c$ .47
$0.73c$ (أ) .49
(ب) 5.9 سنة
$c - v = 0.77$ m/s (أ) .51
0.21 m (ب)
(1.64 × 10^{-13} J أو) 1.02 MeV .53
234 MeV .55
4 × 10^{9} kg/s (أ) .57
(ب) 4 × 10^{7} سنة
(جـ) 1 × 10^{13} سنة
(4.53 × 10^{-12} J أو) 28.3 MeV .59
2470 MeV/c (أ) .61
0 (ب)
1.40 × 10^{4} MeV/c (جـ)
2.5 × 10^{7} kg .63
.65 نعم بالنسبة لإطار إسناد مخزن الحبوبولكن ليس بالنسبة لإطار إسناد الولد.
0.96 c .67
c .69
68 مرة أكبر أو ضعف 6.8 × 10^{21} J .71
1.17 s (أ) .73
2.68 s (ب)

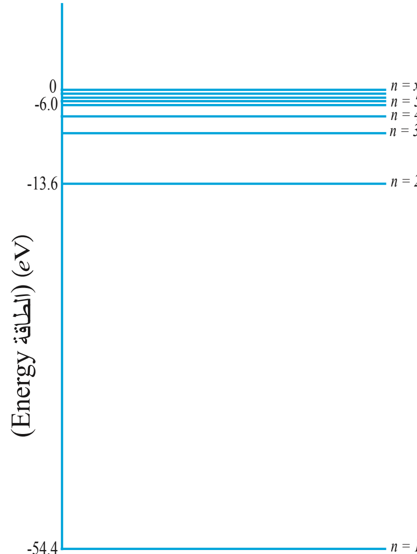
الفصل 27

6.2 × 10^{4} C/kg .1
5 إلكترونات .3
تحت الحمراء ,1.06 × 10^{-5} m (أ) .5
تحت الحمراء ,8.29 × 10^{-7} m (ب)
ميكروويف ,7.25 × 10^{-4}m (جـ)
ميكروويف ,1.06 × 10^{-3} m (د)
5.4 × 10^{-20} J , 0.34 eV .7
9.35 × 10^{-6} m .9

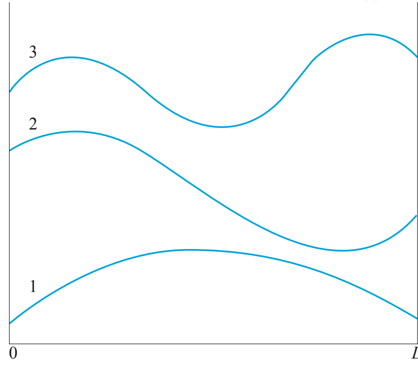
إلى 2.7 × 10^{-19} من .11
3.1 eV إلى 1.7 eV من ,5.0 × 10^{-19} J
2.4 × 10^{-13} Hz, 1.2 × 10^{-5} m .13
6.6 × 10^{-23} kg.m/s .15
(0.12 MeV/c أو)
6.5 × 10^{14} Hz .17
نحاس وحديد .19
0.63 eV .21
2.95 eV .23
1.9 eV، 43 kcal/mol .25
.27



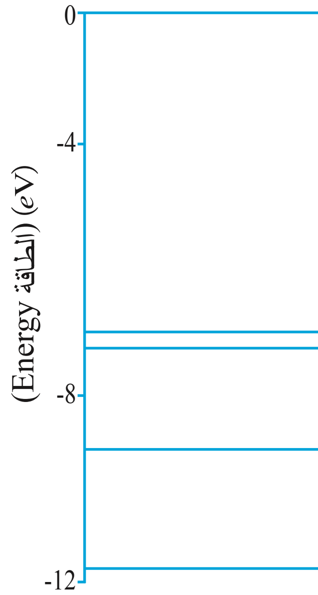
6.7 × 10^{-34} J.s (أ)
5.5 × 10^{14} Hz (ب)
2.30 eV (جـ)
2.42 × 10^{-12} m (أ) .29
1.32 × 10^{-15} m (ب)
55 eV (أ) .31
0.105 nm (ب)
6.61 × 10^{-16} m .33
0.51 MeV ، 0.51 MeV/c .35
2.9 × 10^{-32} m .37
26 V .39
1.3 × 10^{-24} kg.m/s (أ) .41
1.5 × 10^{6} m/s (ب)
6.0 V (جـ)
مرة أصغر 4.7 × 10^{-38} m/s, 6.3 × 10^{38} .45
2.48 × 10^{-11} m .47
3.40 eV .49
122 eV .51
5.26 × 10^{-8} m .55
.57



-27.2 eV, -13.6 eV .59
7.3 × 10^{-3} c ، 0.999973 نعم، .61
(أ) .63



2.4 × 10^{-17}J, 150 eV (جـ)
1.6 × 10^{-66} J ,4.7 × 10^{-33} m/s (د)
1.3 × 10^{-10} m (هـ)
3.27 × 10^{15} Hz .65
4.7 × 10^{26} فوتون/s .67
5.3 × 10^{18} فوتون/s .69
لكل واحدة 0.39 MeV .71
4.7 × 10^{-14} m .73
نعم .1 ,(4.4 × 10^{-40}).75
0.64 V .77
6.7 N .79
سوف لن يتدفق التيار . 1.0 eV .81
(أ) .83



0.4 eV, 2.2 eV, الحالة الأرضية (ب)
2.5 eV, 4.7 eV, 5.1 eV
1.8 × 10^{11} C/kg .85
$E_n = -\frac{3 \times 10^{165}\ J}{n^2}$ .87
لا . $r_n = n^2 (5 \times 10^{-129})$ m

الفصل 28

3.6 × 10^{-7} m .1
5.3 × 10^{-11} m .3
10^{-7} eV .5
3.00 × 10^{-10} eV/c^2 .7
$\Delta x_{electron} = 1.4 \times 10^{-3}$ m .9

$\Delta x_{baseball} = 9.1 \times 10^{-33}$ m
$\Delta x_{electron} \approx (1.5 \times 10^{29})\, \Delta x_{baseball}$

13. 0، 1، 2، 3، 4، 5

15. 14 إلكترون

17. (أ)

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$

هناك مجموعات أخرى محتملة للأعداد الكمية التي لآخر إلكترونين.

(ب)

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$\frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$\frac{1}{2}$
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	0	0	$\frac{1}{2}$
3	0	0	$-\frac{1}{2}$

19. $n \geq 5$؛ $m_l = 4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4$؛ $m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

21. $n \geq 4$؛ $l \geq 3$؛ $m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$.

23. (أ) $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$؛ (ب) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6$؛ (جـ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2$؛

25. (أ) $n = 6$
(ب) -0.378 eV
(جـ) $L = 0,\ l = 0$
(د) $m_l = 0$.

29. (أ) $5f, 5p, 4f, 4p, 3p, 2p$
(ب) أربعة أطوال موجية

31. 41 kV

33. 0.18 nm

35. 0.061 nm، حجب جزئي للنواة بوساطة القشرة $n = 2$.

37. فوتون 6.1×10^{16}، 1.9×10^{-2} J.

39. 5.64×10^{-4} rad
(أ) 170 m
(ب) 2.2×10^{5} m

41. 5.3×10^{-11} m نفسه، نصف قطر بور.

43. $L_{min} = 0$
$L_{max} = 4.72 \times 10^{-34}$ kg. m²/s.

45. (أ) 3.1×10^{-34} m
(ب) 1.8×10^{-32} kg. m²/s

47. 3600 C°/min

49. 2870 $m^{-1/2}$

53. $L_{QM} = 0$، $L_{Bohr} = 2h$ أو $\sqrt{2}\, h$

55. 6.3×10^{-14} s

57. $\Delta P_{proton} : \Delta P_{electron} = 43:1$

59. 1.8×10^{-35} m/s، نعم، 10^{34} s

61. نحاس.

الفصل 29

1. 5.1 eV

3. 4.6 eV

7. 1.10×10^{-10} m.

9. (أ) 1.5×10^{-2} eV, 8.2×10^{-5} m
(ب) 3.0×10^{-2} eV, 4.1×10^{-5} m
(جـ) 4.6×10^{-2} eV, 2.7×10^{-5} m

11. (أ) 720 N/m
(ب) 2.0×10^{-6} m

13. 2.82×10^{-10} m

17. 1.1×10^{-6} m

19. 1.1×10^{6} إلكترون

21. 5×10^{6}

23. 1.9 eV

25. 13 mA

27. (أ) 2.4 mA
(ب) 4.8 mA

29. (أ) 8.1 mA
(ب) 5.7 mA

31. 13 eV

33. (أ) -5.3 eV
(ب) 5.1 eV

35. 1.94×10^{-46} kg.m²

37. 5.50 eV

39. (أ) 9.4×10^{-2} eV
(ب) 6.3×10^{-10} m

41. 6.47×10^{-4} eV

43. (أ) $146\ V \leq V_{supply} \leq 362\ V$
(ب) $3.34\ k\Omega \leq R_{load} < \infty$

الفصل 30

1. $0.149\ u$

3. $3726\ MeV/c^2$

5. (ب) 180 m. (جـ) 2.58×10^{-10} m

7. 6×10^{26}. لا، الكثافة النووية نفسها للأنوية جميعها.

9. 340 MeV

11. 2.224 MeV

13. 7.799 MeV

15. $^{23}_{11}$Na: 8.11 MeV/نيوكلون
$^{24}_{11}$Na: 8.06 MeV/نيوكلون

17. (ب) مستقر

19. 0.783 MeV

21. (أ) β^+
(ب) $^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + e^+ + \nu$
1.819 MeV

23. (أ) $^{234}_{90}$Th
(ب) 234.04367 u

25. 0.0855 MeV

27. (أ) $^{32}_{16}$S
(ب) 31.97152 u

29. 0.862 MeV

31. 0.9602 MeV, 0.9602 MeV, 0 MeV

33. 5.31 MeV

37. (أ) $1.5 \times 10^{-10}\ yr^{-1}$
(ب) 2.3 h

39. (0.0625) أو 1/16

41. نواة 1.31×10^{-20}

43. (أ) 3.13×10^{12} اضمحلال/s
(ب) 3.12×10^{12} اضمحلال/s
(جـ) 4.26×10^{5} اضمحلال/s

45. 0.77 g

47. 1.68×10^{-13} kg

49. 2.6 min

51. 2.58×10^{-3} g

53. $T_{\frac{1}{2}}({}^{218}_{84}Po) : T_{\frac{1}{2}}({}^{214}_{84}Po) = (1.2 \times 10^{6}) : 1$

55. $^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{228}_{88}Ra \rightarrow {}^{228}_{89}Ac \rightarrow$
$^{228}_{90}Th \rightarrow {}^{224}_{88}Ra \rightarrow {}^{220}_{86}Rn$
$^{235}_{92}U \rightarrow {}^{231}_{90}Th \rightarrow {}^{231}_{91}Pa \rightarrow$
$^{227}_{89}Ac \rightarrow {}^{227}_{90}Th \rightarrow {}^{223}_{88}Ra$.

57. $N_D = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$

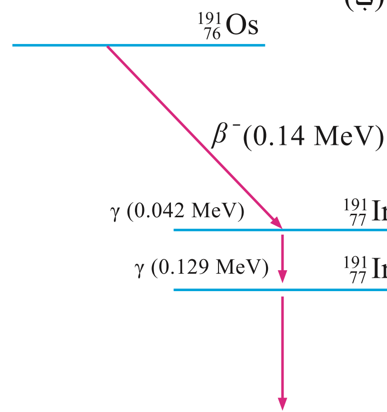
59. 2.3×10^{4} yr

61. 41 yr

63. 6.64 أعمار – النصف

65. (ب) 98%

67. (أ) $^{191}_{77}$Ir
(ب)



69. 550 Mev, 2.5×10^{12} J

71. (أ) 2.4×10^{5} yr
(ب) 2.5×10^{5} yr؛ التأريخ بالكربون غير مفيد للأوقات التي في حدود 10 سنوات أو أكثر.

73. (أ)
$KE_{\alpha} : KE_{\beta} = 5.48 \times 10^{-4} : 1$
(أ) 1.6%
(ب) 0.67%

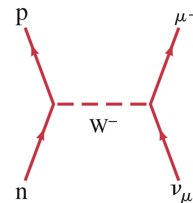
77. 0.18 اضمحلال/s أو 11اضمحلال/min.

الفصل 31

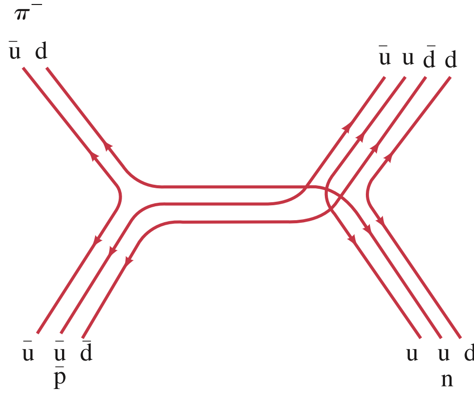
1. $^{28}_{10}Al$, β^-, $^{28}_{14}Si$
3. محتمل
5. 5.701 Mev كمية الطاقة المنبعثة.
7. (أ) نعم
(ب) 19.85 Mev
9. 4.730 MeV
11. $n + {}^{14}{}_{7}N \rightarrow {}^{14}{}_{6}C + p$, 0.626 MeV
13. (أ) $^{3}_{2}He$ تلتقط نيوترون
(ب) $^{11}_{6}C$
(جـ) 1.856 Mev، طارد للحرارة
15. 18.000953 u
17. 173.3 MeV
19. 1/1100
21. 3.7×10^{-7} kg
23. 630 kg
25. 2.1×10^{-16} J أو 1.3 keV
29. 6.0×10^{23} MeV/g
4.9×10^{23} MeV/g
2.1×10^{24} MeV/g
5.1×10^{23} MeV/g
31. 0.38 g
33. 5.3×10^{3} kg/h
35. (ب) 26.73 MeV
(جـ) 1.94 MeV, 2.22 MeV,
7.55 MeV
7.30 MeV, 2.75 MeV, 4.97 MeV
(د) تنافر أكبر من الأنوية التي عددها الذري Z أكبر
37. 4.0 Gy
39. 250 قدما
41. 200 counts/s
43. 2.5 يوم
45. 8.25×10^{-7} Gy/day
47. (أ) $^{131}_{53}I \rightarrow {}^{131}_{54}Xe + e^- + \bar{\nu}$
(ب) 27 يوما
(جـ) 8×10^{-12} kg
49. (أ) $^{218}_{84}Po$
(ب) مشع
α decay: $^{218}_{84}Po \rightarrow {}^{214}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$
β decay: $^{218}_{84}Po \rightarrow {}^{218}_{85}At + e^-$
3.1 min كلاهما
(جـ) يتفاعل كيميائيا
(د) 5.7×10^{6} اضمحلال
2.5×10^{4} اضمحلال
51. (أ) $^{12}_{6}C$
(ب) 5.701 MeV
53. $v_{235} : v_{238} = 1.0043 : 1$
55. 5.1×10^{-2} rem/yr
57. 4.7 m
59. (أ) 1300 kg
(ب 4.1×10^{6} Ci
61. (أ) 4.0×10^{26} W
(ب) 3.7×10^{38} برتون/s
(جـ) 1.0×10^{11} yr
63. (أ) 3700 اضمحلال/s.
(ب) 5.2×10^{-4} Sv/ yr، نحو 15% من الخلفية.
65. 7.274 MeV
67. 96 yr
69. 3 mCi

الفصل 32

1. 7.29 GeV
3. 1.8 T
5. 13 MHz.
7. جسيمات ألفا
λ_{alpha} = 2.2× حجم النيوكلون
λ_{alpha} = 4.4× حجم النيوكلون
9. 1.8×10^{-19} m
11. 5.5 T
15. 33.9 MeV
17. 1879.2 MeV
19. 67.5 MeV
21. 2.3×10^{-18} m
23. (أ) الشحنة. (والغرابة)
(ب) الطاقة
(جـ) عدد البريون والغرابة
27. 69.3 MeV
29. $KE_{\Lambda^\circ} = 8.6$ MeV, $KE_{\pi} = 57.4$ MeV
31. 52.3 MeV
33. 7.5×10^{-21} s
35. (أ) 1.3 keV
(ب) 8.9 keV
37. (أ) ممنوع. الطاقة غير محافظة
(ب) ممنوع. عدد الليبتون غير محافظ
(جـ) محتمل
39. (أ) $\bar{p}$
(ب) $\bar{\Sigma}^-$
(جـ) K^-
(د) π^-
(هـ) $D\bar{s}$
41. $D\bar{s} = c\bar{s}$
43.



45. (أ) 0.38 A
(ب) 1.0×10^{2} m/s
47. (أ) 1.022 MeV
(ب) 1876.6 MeV
49. (أ) ممنوع بوساطة حفظ الشحنة.
(ب) محتمل بوساطة التفاعل القوي.
(جـ) ممنوع بوساطة حفظ الغرابة للتفاعل القوي. محتمل بوساطة التفاعل الضعيف.
(د) ممنوع بوساطة حفظ الغرابة للتفاعل القوي. محتمل بوساطة التفاعل الضعيف.
(هـ) محتمل بوساطة التفاعل الضعيف.
53. -135.0 MeV, -140.9 MeV
55. 64 فيرميونا أساسيا
57. (ب) 10^{29} k
59. 6.59×10^{-5} m
61.



الفصل 33

3. 4.8 ly
5. 0.059", 17 pc
7. 110 yr
9. 3.7×10^{-2}
11. 1.4×10^{-4} kg/m^3
14. 1.83×10^{-9} kg/m^3، أكبر بنحو 3.33×10^{5} مرة
15. -0.092 MeV, 7.366 MeV
17. $d_1/d_2 = 0.15$
19. 4×10^{14} m
21. 540°
23. 1.6×10^{8} ly
25. (أ) 656 nm
(ب) 661 nm
(جـ) 1670 nm
27. $0.44c$
31. 6 نيوكلون/m^3
33. (أ) 10^{-5} s
(ب) 10^{-7} s
(جـ) 10^{-4} s
35. 5 ly
37. 5×10^{9}
39. 2×10^{28} N
41. d_{400} nm / d_{600} nm ≈ 1.4
43. $0.88c$
45. 2×10^{-3}
47. (أ) 13.933 MeV
(ب) 4.7 MeV
(جـ) 3.7×10^{10} K
49. 400 ly ≈ أكبر بنحو 2×10^{7} مرة.
أصغر بـ 100 مرة.

فهرست

الاختصار defn تعني: الصفحة المعنية تعطي تعريف الحدة fn تعني المرجع في ملاحظة أسفل الصفحة؛ pr تعني موجود في مسألة أو سؤال؛ ff تعني أيضًا الصفحات التالية

حقوق نشر الصور

Title page Art Wolfe/Getty Images, Inc. **CO-1** NOAA/Phil Degginger/Color-Pic, Inc. **1-01** Erich Lessing/Art Resource, N.Y. **1-02a, 1-02b** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **1-03** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **1-04a** Philip H. Coblentz/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **1-04b** Antranig M. Ouzoonian, P.E./Weidlinger Associates, Inc. **1-05** Mary Teresa Giancoli **1-06a, 1-06b** Douglas C. Giancoli **1-07** Paul Silverman/Fundamental Photographs **1-08a** Oliver Meckes/Eye of Science/Max-Planck-Institut-Tubingen/Photo Researchers, Inc. **1-08b** Douglas C. Giancoli **1-09** Adolfo Viansson **1-10a** Douglas C. Giancoli **1-11** Larry Voight/Photo Researchers, Inc. **1-14** David Parker/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **1-15** The Image Works **CO-2** George D. Lepp/CORBIS BETTMANN **2-08** John E. Gilmore, III **2-16** SuperStock, Inc. **2-17** Nimatallah/Art Resource, N.Y. **2-18** Harold E. Edgerton/Palm Press, Inc. **CO-3** Michel Hans/ Vandystadt/Getty Images, Inc.–Allsport Photography **3-17** Berenice Abbott/Commerce Graphics Ltd., Inc. **3-19** Richard Megna/Fundamental Photographs **3-27a** Dave Wilhemi/Corbis/Stock Market **3-27b** Guy Vanderelst/Taxi/Getty Images, Inc.–Taxi **3-27c** Douglas C. Giancoli **CO-4** Mark Wagner/Aviation-images.com **4-01** Daly & Newton/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **4-04** Bettmann/Corbis **4-05** Gerard Vandystadt/Agence Vandystadt/Photo Researchers, Inc. **4-07** David Jones/Photo Researchers, Inc. **4-10** Tsado/NASA/Tom Stack & Associates, Inc. **4-37** Lars Ternblad/Getty Images, Inc.–Image Bank **4-39** Kathleen Schiaparelli **4-41** AP/Wide World Photos **4-63** Tyler Stableford/The Image Bank/Getty Images, Inc. **CO-5** Earth Imaging/Getty Images Inc.–Stone Allstock **5-06c** Jay Brousseau/Getty Images, Inc.–Image Bank **5-12** Guido Alberto Rossi/ Getty Images, Inc.–Image Bank **5-23** NASA/Johnson Space Center **5-27a** AP/Wide World Photos **5-27b** Mickey Pfleger/Photo 20-20/PictureQuest **5-27c** Dave Cannon/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **5-34** C. Grzimek/Okapia **5-35** Daniel L. Feicht/ Cedar Fair L.P. **CO-6** Al Bello/Getty Images, Inc.–Liaison **6-21** Harold E. Edgerton/Palm Press, Inc. **6-22** David Madison/David Madison Sports Images, Inc. **6-25** AP/Wide World Photos **6-28** Nick Rowe/Getty Images, Inc.–Photodisc **6-42** CORBIS BETTMANN **6-46** R. Maisonneuve/Publiphoto/Photo Researchers, Inc. **CO-7** Richard Megna/Fundamental Photographs **7-01** Stephen Dunn/Getty Images, Inc.–Liaison **7-08** Loren M. Winters/Visuals Unlimited **7-15** D.J. Johnson **7-18** Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **7-22** Berenice Abbott/Photo Researchers, Inc. **7-28** John McDermott Photography **CO-8** Tom Stewart/CORBIS BETTMANN **8-07a** Jeff Greenberg/Photo Researchers, Inc. **8-11a** Richard Megna/Fundamental Photographs **8-11b** Photoquest, Inc. **8-34** Tim Davis/Photo Researchers, Inc. **8-35** Regis Bossu/Corbis/Sygma **8-36** AP/Wide World Photos **8-38** Karl Weatherly/Getty Images, Inc.–Photodisc. **8-42** Tom Stewart/CORBIS BETTMANN **8-56a** Michael Kevin Daly/Corbis/ Stock Market **CO-9** John Kelly/Getty Images, Inc.–Image Bank **9-01** AP/Wide World Photos **9-21** Douglas C. Giancoli **9-23a, 9-23b** Mary Teresa Giancoli **9-26** Fabricius & Taylor/Getty Images, Inc.–Liaison **9-28a** Douglas C. Giancoli **9-28b** Galen Rowell/ Mountain Light Photography, Inc. **9-30** Douglas C. Giancoli **9-32** Giovanni Paolo Panini (Roman, 1691–1765), "Interior of the Pantheon, Rome," c. 1734. Oil on canvas, 1.280 * .990 (50 1/2 * 39); framed, 1.441 * 1.143 (56 3/4 * 45). Samuel H. Kress Collection. Photograph © 2001 Board of Trustees, National Gallery of Art, Washington. 1939.1.24.(135)/PA. Photo by Richard Carafelli **9-33** Douglas C. Giancoli **9-34a** Italian Government Tourist Board **9-56** Peter LaMastro/Getty Images, Inc. **CO-10** Verlinden, Vic/Getty Images, Inc.–Image Bank **10-10** CORBIS BETTMANN **10-19a-R, 10-19b-R,** David Hazen **10-33a** Lester V. Bergman/CORBIS BETTMANN **10-33b** Biophoto Associates/Photo Researchers, Inc. **10-34** Rod Planck/ Tom Stack & Associates, Inc. **10-36** Alan Blank/Bruce Coleman, Inc. **10-46** Douglas C. Giancoli **10-48** Adam Jones/Photo Researchers, Inc. **10-52** NASA Goddard Space Flight Center/Science Source/Photo Researchers, Inc. **CO-11L** Fundamental Photographs **CO-11R** Jonathan Nourok/PhotoEdit **11-04** Robert Reiff/Getty Images, Inc.–Taxi **11-07** Gary Carter/Visuals Unlimited **11-11** Photo Researchers, Inc. **11-13** Douglas C. Giancoli **11-17** Taylor Devices, Inc. **11-19a** AP/Wide World Photos **11-19b** Corbis/Sygma **11-20** Douglas C. Giancoli **11-27** Art Wolfe/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **11-37** Douglas C. Giancoli **11-42** Visuals Unlimited **11-48** Gallant, Andre/Getty Images, Inc.–Image Bank **11-55** Richard Megna/Fundamental Photographs **CO-12** Fra Angelico, Linaioli Altarpiece, detail. Museo di San Marco, Florence, Italy. Scala/Art Resource, N.Y. **12-04** Yoav Levy/Phototake NYC **12-09a** Andy Sacks/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **12-09b** Getty Images, Inc.–Liaison **12-10** Bob Daemmrich/The Image Works **12-24** Norman Owen Tomalin/Bruce Coleman, Inc. **12-25b** SETTLES, GARY S./ Photo Researchers, Inc. **12-28a** P. Saada/Eurelios/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **12-28b** Howard Sochurek/ Medical Images, Inc. **12-38** Dallas & John Heaton/CORBIS BETTMANN **CO-13** Johner/Amana America, Inc. **13-03** Bob Daemmrich/Stock Boston **13-04a, 13-04b, 13-04c** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **13-06** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **13-14** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **13-15** Michael Newman/PhotoEdit **13-23** Paul Silverman/ Fundamental Photographs **13-24** JACK DANIELS/Getty Images, Inc.–Taxi **13-25a, 13-25b, 13-25c** Mary Teresa Giancoli **13-28** Kennan Harvey/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **13-29** Brian Yarvin/Photo Researchers, Inc. **CO-14** Bill Losh/Getty Images, Inc.–Taxi **14-11** Getty Images, Inc.–Hulton Archive Photos **14-14a, 14-14b** Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **14-16** Phil Degginger/Color-Pic, Inc. **14-22** Taxi/Getty Images, Inc. **CO-15L** David Woodfall/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **CO-15R** AP/Wide World Photos **15-09** Will Hart **15-10a, 15-10b, 15-10c** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **15-20a** Sandia National Laboratories **15-20b** Martin Bond/Science Photo Library/Photo Researschers, Inc. **15-20c** Lionel Delevingne/Stock Boston **Table 15-4** (clockwise from top right) Ed Degginger/Color-Pic, Inc; Michael Collier; Malcolm Fife/Getty Images, Inc.–Photodisc; Inga Spence/Visuals Unlimited **15-25** Geoff Tompkinson/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **15-26** Inga Spence/Visuals Unlimited **15-27** Michael Collier **CO-16** Fundamental Photographs **16-36** Michael

J. Lutch/Boston Museum of Science **16-43** Dr. Gopal Murti/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **CO-17** Gene Moore/Phototake NYC **17-13c** Tom Pantages/Tom Pantages **17-17** Tom Pantages/Tom Pantages **17-18** Custom Medical Stock Photo, Inc. **17-22** Jon Feingersh/Jon Feingersh **CO-18** Mahaux Photography/Getty Images Inc. — Image Bank **18-01** J. L. Charmet/Science Photo Library/Photo Researchers **18-06b** Dave King/Dorling Kindersley Media Library **18-11** T. J. Florian/Rainbow **18-15** Richard Megna/Fundamental Photographs **18-16** Tony Freeman/PhotoEdit **18-18** Barbara Filet/Tony Stone Images **18-32** Jerry Marshall/Jerry Marshall **18-34** Scott T. Smith/Corbis/Bettmann; www.corbis.com/Scott T. Smith/Corbis Images **18-36** Jim Wehtje/Getty Images, Inc. — Photodisc. **CO-19** Courtesy of iRiver **19-24** Dept. Clinical Radiology, Salisbury District Hospital/SPL/Photo Researchers, Inc.; Department of Clinical Radiology, Salisbury District Hospital/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **19-27a** Getty Images, Inc. — Photodisc. **19-27b** William E. Ferguson/William E. Ferguson **19-27c** Ed Degginger/Color-Pic, Inc. **19-29a** Paul Silverman/Fundamental Photographs **19-29b** Paul Silverman/Fundamental Photographs **CO-20** Chris Rogers/Rainbow; © 2000 Chris Rogers/Rainbow **20-01** Unidentified/Dorling Kindersley Media Library; © Dorling Kindersley **20-04a** Stephen Oliver/Dorling Kindersley Media Library; Stephen Oliver © Dorling Kindersley **20-06** Mary Teresa Giancoli **20-08a** Richard Megna/Fundamental Photographs **20-18** Pekka Parviainen/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **20-50** Clive Streeter/Dorling Kindersley Media Library; Clive Streeter © Dorling Kindersley **CO-21** Richard Megna/Fundamental Photographs **21-08** Diva de Provence **21-13** Werner H. Muller/Peter Arnold, Inc. **21-21** Joe Raedle/Getty Images, Inc — Liaison **21-27b** Pete Saloutos/Corbis/Bettmann **21-30a** Richard Megna/Fundamental Photographs **CO-22** Jeremy Woodhouse/Getty Images, Inc. — Photodisc. **22-01** American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives **22-09** Image Works **22-18** Larry Mulvehill/The Image Works; © Larry Mulvehill/The Image Works **22-21** World Perspectives/Getty Images, Inc. — Stone Allstock **CO-23** Mulvehill/The Photo Works **23-05** Douglas C. Giancoli **23-9a** Mary Teresa Giancoli/Mary Teresa Giancoli; Mary Teresa Giancoli and Suzanne Saylor **23-9b** Paul Silverman/Fundamental Photographs **23-18** Travel Pix Ltd./SuperStock, Inc. **23-21** Mary Teresa Giancoli **23-28b** S. Elleringmann/Bilderberg/Aurora & Quanta Productions, Inc. **23-30** Douglas C. Giancoli and Howard Shugat **23-46** Mary Teresa Giancoli **CO-24** Dave King/Dorling Kindersley Media Library; Dave King © Dorling Kindersley **24-04a** John M. Dunay IV/Fundamental Photographs **24-13** Science Photo Library/David Parker/Photo Researchers **24-17** George B. Diebold/Corbis/Bettmann **24-31b** Ken Kay/Fundamental Photographs **24-33** Bausch & Lomb Incorporated **24-35** Kristen Brochmann/Fundamental Photographs **24-51** Texas Instruments Incorporated **24-52b** Dan Rutter/Daniel Rutter; © Daniel Rutter/Dan's Data **24-55** Pekka Parviainen/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **24-56** Spike Mafford/Getty Images, Inc. — Photodisc. **CO-25** Richard Megna/Fundamental Photographs **25-04** Mary Teresa Giancoli **25-07** Leonard Lessin/Peter Arnold **25-18** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence, Italy **25-20** Yerkes Observatory **25-21c** Palomar/Caltech **25-21d** Roger Ressmeyer/Starlight **25-23b** Olympus America Inc. **25-28** Reproduced by permission from M. Cagnet, M. Francon, and J. Thrier, *The Atlas of Optical Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag, 1962. **25-31** Space Telescope Science Institute **25-32** National Astronomy & Ionosphere Center, Cornell University, Arecibo, Puerto Rico **25-36** Photo by W. Friedrich/Max von Laue. Burndy Library, Dibner Institute for the History of Science and Technology, Cambridge, Massachusetts. **25-40** Rosalind Franklin/Photo Researchers **25-44a** Martin M. Rotker/Martin M. Rotker **25-44b** Simon Fraser/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **25-47** Ron Chapple/Getty Images, Inc. — Taxi **CO-26** Cambridge University Press; "The City Blocks Became Still Shorter" from page 4 of the book, "Mr Tompkins in Paperback" by George Gamow. Reprinted with the permission of Cambridge University Press. **26-01** Corbis/Bettmann **26-11** Cambridge University Press; "Unbelievably Shortened" from page 3 of "Mr Tompkins in Paperback" by George Gamow. Reprinted with the permission of Cambridge University Press. **CO-27** P. M. Motta and F. M. Magliocca/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **27-11** S. A. Goudsmit/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives **27-12** Education Development Center, Inc. **27-15a** Lee D. Simon/Science Source/Photo Researchers, Inc. **27-15b** Oliver Meckes/Max-Planck-Institut-Tubingen/Photo Researchers, Inc. **CO-28** Richard Cummins/Corbis/Bettmann; © Richard Cummins/Corbis **28-01** American Institute of Physics/Emilio Segrè Visual Archives **28-02** ED. Rosetti/American Institute of Physics/Emilio Segrè Visual Archives **28-04** Advanced Research Lab, Hitachi, Ltd. **28-15** Mark Schneider/Visuals Unlimited **28-21** Yoav Levy/Phototake NYC **28-23** Philippe Plaily/Photo Researchers, Inc. **CO-29** Intel Corporation Pressroom Photo Archives **CO-30** Reuters Newsmedia Inc./Corbis **30-03** Center for the History of Chemistry **30-07** University of Chicago/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/Courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives **30-16** Fermilab Visual Media Services **CO-31** Peter Beck/Corbis/Bettmann; © Peter Beck/CORBIS **31-05** Gary Sheahan, "Birth of the Atomic Age," Chicago (Illinois); 1957. Chicago Historical Society, ICHi-33305. **31-08** LeRoy N. Sanchez/Los Alamos National Laboratory **31-10** Corbis **31-13** Lawrence Livermore National Laboratory/Science Source/Photo Researchers, Inc. **31-16** J. Van't Hof. **31-21** Southern Illinois University/Peter Arnold, Inc. **31-23** Mehau Kulyk/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **CO-32** Fermilab/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **32-01** Science Service/Watson Davis/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives/Physics Today Collection **32-03a** Fermilab Visual Media Services **32-03b** Fermilab Visual Media Services **32-04b** Barrie Rokeach/Aerial/Terrestrial Photography **32-05** CERN/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **32-09** Science Photo Library/Photo Researchers **32-10** Brookhaven National Laboratory **CO-33** NASA/WMAP Science Team/NASA Headquarters **33-01** NASA Headquarters **33-02** Photo Researchers **33-03** U.S. Naval Observatory Photo/NASA Headquarters **33-04** National Optical Astronomy Observatories **33-09** Hubble Space Telescope/NASA/NASA Headquarters; Courtesy of NASA and the Hubble Heritage Team **33-11** National Optical Astronomy Observatories **33-22** Bell Photographers, Inc. **33-24** NASA Headquarters; GSFC/NASA **33-28** Dr. Wes Colley